SCIENCES ET AVENIR

SPÉCIAL 20 PAGES

Booster son immunité

Les conseils des meilleurs spécialistes p.50

Nadine Cerf-Bensussan, Grand Prix Inserm 2023

Alain Fischer Professeur émérite au Collège de France

Gérard Eberl, Immunologue à l'Institut Pasteur de Paris

© BRUNO LEVY - ELENAB/SHUTTERSTOCK - PHOTOMONTAGE SetA : SHUTTERSTOCK AI GENERATOR + A. BRANDON/SIPA

SCIENCES ET AVENIR - N° 938 - AVRIL 2025 - BOOSTER SON IMMUNITÉ

AVRIL 2025 - N° 938 - ALLEMAGNE 7,40 € / ITALIE 5,70 € / LUXEMBOURG 5,70 € / GRÈCE 5,70 € / BELGIQUE 5,70 € / ESPAGNE 5,70 € / PORTUGAL 5,70 € / DOM 5,90 € / TOM 800 XPF / ILE MAURICE : 8,60€ / TOM (AVION) 1500 XPF / SUISSE 9,50 CHF / TUNISIE 10 TND / MAROC 55 DH / CANADA-USA 8,20 $

L 13418 - 938 H - F: 5,30 € - RD

Votre playlist a intérêt à être longue.

126 km d'autonomie 100 % électrique
et jusqu'à 930 km d'autonomie cumulée.*

Nouveau Tayron eHybrid.
Chacun y trouve sa place.

* Distance totale maximum en combinaison essence/électrique pour un Nouveau Tayron 1.5 eHybrid dont 126 km en 100 % électrique, données WLTP. L'autonomie réelle en mode tout électrique dépend de nombreux paramètres dont l'équipement, le style de conduite et la vitesse. Plus d'informations sur volkswagen.fr

Modèle présenté : Nouveau Tayron R-Line Edition 1.5 eHybrid 204 ch. Certains équipements sont en option.

Cycles mixtes de la gamme Nouveau Tayron 1.5 eHybrid (l/100 km) WLTP : 0,4-0,6. Rejets de CO_2 (g/km) WLTP : 9-12. Valeurs au 15/02/2024, susceptibles d'évolution. Plus d'informations auprès de votre Partenaire.

Volkswagen Group France – SAS au capital de 198 502 510 € – 11, av. de Boursonne, Villers-Cotterêts – RCS Soissons 832 277 370.

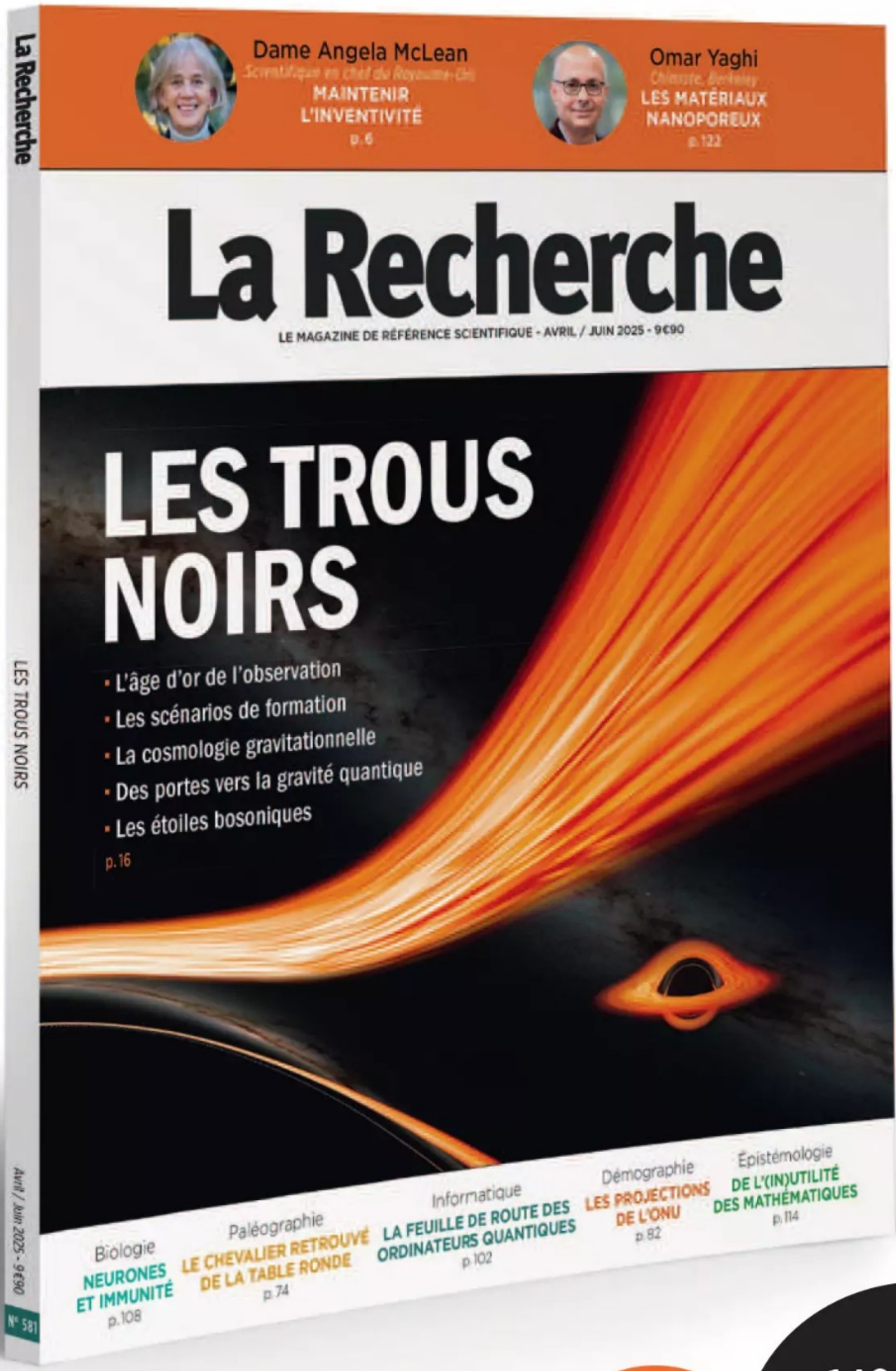
Pour les trajets courts, privilégiez la marche

ou le vélo #SeDéplacerMoinsPolluer

35 SCIENTIFIQUES PARTICIPENT À CE NUMÉRO

La Recherche

LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE



Chez votre marchand de journaux

148 pages
MAGAZINE-LIVRE
Trimestriel

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

La science n'est pas une opinion

« *Je crois que cette nation devrait s'engager à atteindre l'objectif, avant la fin de cette décennie, d'envoyer un homme sur la Lune et le ramener sain et sauf sur Terre.* » Lorsque John Fitzgerald Kennedy prononce ces mots devant le Congrès américain le 25 mai 1961, le monde est en pleine guerre froide. Un an plus tard, avec la crise des missiles de Cuba, jamais l'humanité n'a été aussi proche d'un conflit nucléaire. Difficile de ne pas y penser en 2025, quand Donald Trump lance à son tour devant le Congrès : « *Nous allons conquérir les vastes frontières de la science, et nous allons mener l'humanité dans l'espace, planter le drapeau américain sur la planète Mars et même bien au-delà.* » Un écho à sa promesse formulée dès son discours d'investiture (*p. 26*). Mais alors que Kennedy ouvrait la voie à l'exploration scientifique, Trump, lui, semble au contraire la piétiner : licenciements, coupes budgétaires, restrictions de déplacement pour les chercheurs, suppression de données environnementales sur les sites gouvernementaux…

La science doit être protégée pour ne pas devenir l'otage de l'idéologie

« *L'université et la recherche font aujourd'hui l'objet d'attaques d'une ampleur inédite depuis la Seconde Guerre mondiale* », alertait le mouvement Stand Up for science en France appelant à une mobilisation le 7 mars dernier. Quant à Elon Musk, qui incarne le projet martien (*p. 32*), il est devenu l'un des principaux acteurs de ces attaques à travers le Département de l'efficacité gouvernementale (Doge).
La conquête de Mars mérite mieux. La science doit être protégée pour ne pas devenir l'otage de l'idéologie.
Car comme aime à le rappeler le biologiste Gilles Boeuf, dans les pas de Gaston Bachelard, « *elle n'est pas une opinion.* » ■

SCIENCES ET AVENIR

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (11 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (11 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Rédacteur en chef Sciences et Avenir Mathieu NOWAK - 01.55.35.56.38
Rédacteur en chef La Recherche Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR - 01.55.35.56.15
Rédaction en chef Les Dossiers Vincent REA - 01.55.35.56.35
avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Adjoint à la rédaction en chef
Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s
Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32
Hugo JALINIÈRE (Sciences et Avenir) - 01.55.35.56.52
Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59, Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28, Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Chef(fe)s de service Rachel FLÉAUX (MULOT) (enquêtes) - 01.55.35.56.07, Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46, Hervé RATEL (adjoint, actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78, Mathias GERMAIN (La Recherche, biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33, Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Rédaction Marine BENOIT (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.23
Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27
Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Assistante de direction Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Collaborateurs(trices) Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueurs Sylvie BENZONI-GAVAGE, Christophe CASSOU, Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH, Claire MATHIEU
Ont participé à ce numéro P. BERLOQUIN, S. BRIET, A. CARLIEZ, V. CLUZEL, C. COUMAU, E. DAUTRY, N. GUTIERREZ C., P. KALDY, J.-F. LAGROT, L. MAROLLÉ, E. TISSANDIÉ
1re secrétaire de rédaction Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Pôle digital Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70, Isabelle DO O'GOMES (cheffe de rubrique, veille) - 01.55.35.56.49, Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24, Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15, Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56, Astrid SAINT AUGUSTE (rédactrice spécialisée) - 01.55.35.56.48, Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Yann BOURDAIS chef de projet junior - Flora ISSINGUI cheffe de projet marketing digital
Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines William AFTHONIADES - wafthoniades@challenges.fr
Responsable paye Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Sarah RABBAH
Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directrice de publicité Caroline GILLES - 01.44.88.89.03
Exécution : Emilien RIGNOLS - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable réabonnement: Yasmina FERHAT – 01.55.35.56.64
Responsable du marketing direct Lina GUACH - 01.55.35.56.63
Partenariats et événements – Alain SCEMAMA - 01.58.65.03.58

Les Éditions Croque Futur
Président, directeur de la publication Claude PERDRIEL
Directeur général Philippe MENAT
Directeur éditorial Maurice SZAFRAN
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL

Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,018 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France (Lognes), certifié PEFC

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC 10-31-1557 pefc-france.org
FR
ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte une lettre de « bienvenue aux abonnés » jetée sur une partie de la diffusion abonnés ainsi qu'un message « Sciences et Avenir » et un encart « L'Homme Moderne» jetés sur couverture sur la totalité de la diffusion abonnés.
Commission paritaire n° 0225 K 79712.
ISSN 3040-0457. Distribué par MLP.

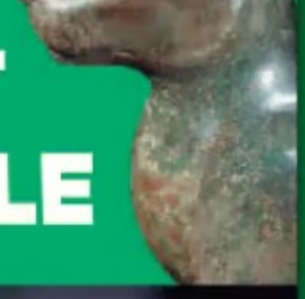
Le magazine des passionnés d'histoire

L'Histoire

www.lhistoire.fr

De Bastet au chat-chien

CHAT DIEU CHAT DIABLE



Liban

Le pays déchiré

- 1860, le massacre des chrétiens
- 1930-1960 : l'État le plus moderne du monde arabe
- Maronites, Druzes, Palestiniens, Chiites... le spectre de la guerre civile

Beyrouth, février 1995

En kiosque le 27 mars et sur www.lhistoire.fr

SOMMAIRE

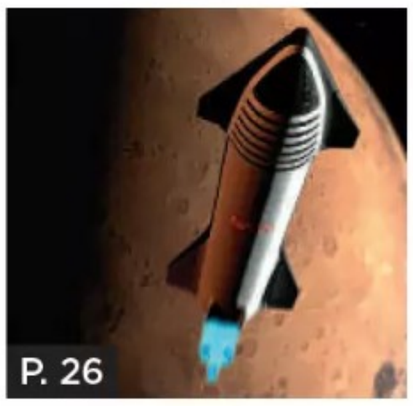
Sciences et Avenir / N° 938 / Avril 2025

DOSSIER P. 50

ALIMENTATION, SPORT, SOMMEIL…

Booster son immunité

Notre système de lutte contre les agressions extérieures se construit dès la naissance et évolue avec l'âge. Dans ce dossier spécial, « Sciences et Avenir » a interrogé les meilleurs spécialistes qui prodiguent leurs conseils pour renforcer nos défenses naturelles.



P. 26

Objectif Mars : les défis d'un vol habité

Le projet du président américain d'envoyer des astronautes sur Mars avant 2029 est-il réalisable ? De l'astrophysique à la médecine ou la psychologie, les réponses des chercheurs.

P. 40

Mpox : à la recherche de l'animal réservoir

En République démocratique du Congo où la variole du singe est endémique, une mission tente d'identifier l'animal jouant le rôle de réservoir du virus. Reportage au cœur de la forêt.

P. 76

À Troie, sous les vestiges, le mythe

Les archéologues retournent depuis 160 ans la colline d'Hissarlik (Turquie), rêvant d'accorder la réalité du terrain avec la cité mythique d'Homère. Un défi face à ce site plurimillénaire.

5 **Édito** par Mathieu Nowak

8 **Courrier**

SCIENCES FONDAMENTALES

10 **ACTUALITÉS** Tylos, la planète des ouragans extrêmes / Moisson inédite de ceintures d'exocomètes

26 **Objectif Mars : les défis d'un vol habité**

34 **Le supersolide, un nouvel état entre cristal et superfluide**

38 **Journal de l'IA : De l'intelligence physique dans les robots**

NATURE

14 **ACTUALITÉS** Des gènes de mammouth pour une souris laineuse / La guérison anthropique de la couche d'ozone

40 **Mpox : à la recherche de l'animal réservoir**

46 **Les bovins menacés par un appauvrissement génétique**

SANTÉ

18 **ACTUALITÉS** L'effet anticancer de l'aspirine élucidé / L'aorte fonctionne comme un deuxième cœur

70 **Les prouesses de la psychiatrie de précision**

74 **Nutrition : Manger cru, bonne ou mauvaise idée ?**

HISTOIRE

22 **ACTUALITÉS** Découverte de la tombe de Thoutmosis II / Un fossile précise l'origine des oiseaux

76 **Troie : sous les vestiges, le mythe**

82 **Des peuples anciens dans les dunes d'Oman**

86 **Histoire des sciences : Controverse sur les neiges du Kilimandjaro**

TRANSVERSALES

90 **Sélection livres**

92 **Expositions**

94 **Chroniques**
Climat par Christophe Cassou et Céline Guivarch / Mathématiques par Sylvie Benzoni-Gavage / Éthique par Jean-Gabriel Ganascia / L'œil d'Olivier Lascar

96 **Questions de lecteurs**

97 **Le ciel d'avril**

98 **Jeux**

MOHAMMED ELAMINE ALIOUI / GETTY IMAGES - MARK GARLICK/SCIENCE PHOTO LIBRARY/SUCRÉ SALÉ - JEAN-FRANÇOIS LAGROT - ALAMY/ PHOTO12

COURRIER

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

« La fin du Gulf Stream ? »
(*Sciences et Avenir* n° 937, mars 2025)

Ayant lu hier avec un très grand intérêt votre excellent dossier sur la fin du Gulf Stream, j'entends aujourd'hui les décisions délirantes de Donald Trump concernant les émissions de CO_2 et autres destructions de l'environnement. Je me demande donc dans quelle mesure les milliards de tonnes supplémentaires de CO_2 que ses décisions vont générer pourraient accélérer l'affaiblissement, voire l'arrêt du Gulf Stream ? Je suppose aussi que les efforts faits par l'Europe afin de diminuer ses émissions de CO_2 seront totalement dérisoires face à l'augmentation générée par les États-Unis.

Claude Rowies

S. et A. : Selon le bureau d'études Carbon Tracker, la politique voulue par Donald Trump devrait générer 4 milliards de tonnes de CO_2 supplémentaires d'ici à 2030. Mais il est impossible de relier ce surcroît à un ralentissement accru de l'Amoc, l'ensemble des courants de l'océan Atlantique. Rappelons cependant que les émissions mondiales annuelles sont dix fois plus importantes. Ce qui signifie que ni les efforts des Européens, ni ceux des Indiens, des Chinois, etc. ne sont dérisoires, car ce défi concerne l'humanité entière. La moitié des États américains ne suivent d'ailleurs pas la politique de Donald Trump.

Dangereux fructose

Dans votre numéro 936 de *Sciences et Avenir* (que j'ai pris autant de plaisir à lire que les précédents !), vous nous présentez dans un article en page 22 la démonstration par des chercheurs américains de l'influence du fructose sur la croissance de tumeurs cancéreuses. Rassurez-moi : cet effet néfaste n'est-il valable que pour le fructose ajouté dans l'industrie agroalimentaire, ou vaut-il aussi pour le fructose présent naturellement dans les fruits ?

Cécilia Vigny

S. et A. : En réponse à votre légitime interrogation, l'effet néfaste du fructose est dû à son absorption rapide et massive, ce qui impose son métabolisme rapide par le foie. Le fructose est aussi présent dans les fruits, mais il est associé à des fibres qui ralentissent son absorption. Lorsqu'il est ajouté chimiquement pur aux aliments transformés (ketchup, sodas, sucreries, etc.), il est beaucoup plus rapidement absorbé et arrivera en quantités importantes s'il est consommé pendant et entre les repas.

Transmutation des déchets nucléaires

J'ai lu avec beaucoup d'attention votre article « Transmutation : réduire la durée de vie des déchets nucléaires » (*S. et A.* n° 937). Vous expliquez comment les protons sont créés et comment ils sont accélérés, puis dans la suite de l'article, vous ne parlez que de neutrons. J'avoue ne pas avoir compris le passage de l'un à l'autre.

Dominique Roizot

S. et A. : Projetés dans le réacteur par l'accélérateur, les protons entrent en collision avec les atomes du plomb bismuth, fluide caloporteur au cœur du réacteur. Cette collision entraîne la séparation des neutrons constituant les atomes du fluide. Ces neutrons vont ainsi provoquer, à leur tour, la fission du combustible usé et des actinides en déclenchant une réaction en chaîne.

La science, CQFD.
Natacha Triou
DU LUNDI AU JEUDI
16H – 17H
> Disponible sur le site et l'appli Radio France.

© Radio France/Ch. Abramowitz
En partenariat avec
SCIENCES ET AVENIR
france culture
L'esprit d'ouverture

TSFJAZZ.COM
TSF JAZZ ET LIVE NATION
en accord avec Montuno

PRÉSENTENT LA 2ème ÉDITION DU

TSF JAZZ CHANTILLY FESTIVAL

SAMEDI 5 ET DIMANCHE 6 JUILLET 2025

DANS LE PARC DU CHÂTEAU DE CHANTILLY

15 CONCERTS
100 ARTISTES

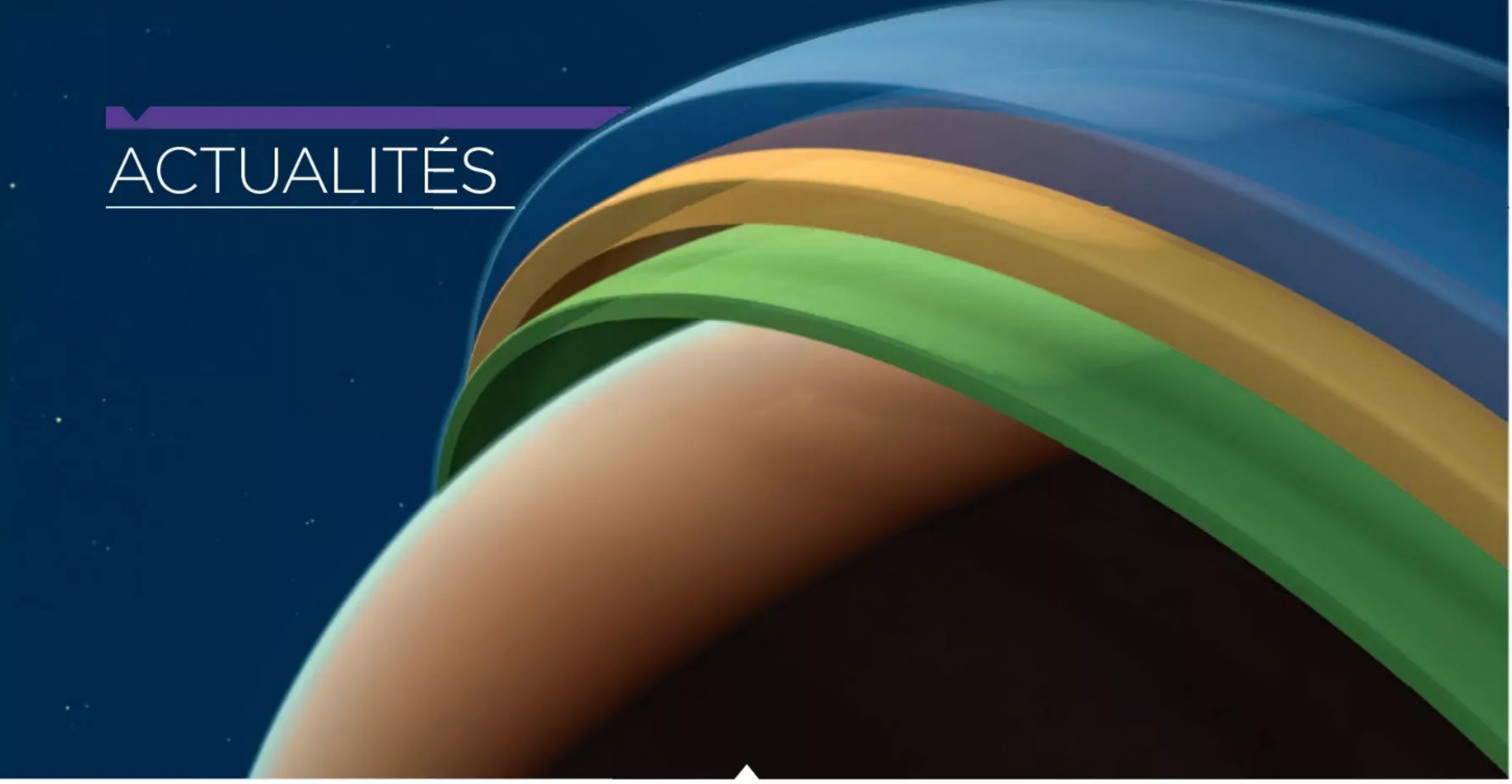
SAMARA JOY · MARCUS MILLER · MONTY ALEXANDER
AVISHAI COHEN · KAMASI WASHINGTON · SOPHYE SOLIVEAU
GABI HARTMANN · ISAIAH COLLIER · SULLIVAN FORTNER · TYREEK MCDOLE
LUDOVIC LOUIS · THE HOOKUP - LAURENT / MOUTIN(S) / HUCHARD
COULONDRE / DOLMEN / PRIVAT · FANOU TORRACINTA

JAZZ CELEBRATION

BILLETTERIE OUVERTE DANS TOUS LES POINTS DE VENTE HABITUELS
PLUS D'INFOS SUR WWW.TSFJAZZCHANTILLYFESTIVAL.COM

LE FESTIVAL 100 % JAZZ

Ville de Chantilly
Ville d'Art et d'Histoire
Château de Chantilly
INSTITUT DE FRANCE
Région Hauts-de-France
Aire Cantilienne
Le Parisien
media transports
Pour une publicité utile
Vive le jazz



L'atmosphère de WASP-121b est divisée en trois couches, avec des vents de fer à la base (vert), suivis d'un courant-jet très rapide de sodium (jaune), et enfin une couche supérieure de vents d'hydrogène (bleu).

Tylos, la planète des ouragans extrêmes

Les observations de cette exoplanète révèlent l'existence d'un courant-jet équatorial atteignant des vitesses de 90 000 km/h.

Pour la première fois, des astronomes ont cartographié en trois dimensions les vents d'une exoplanète, révélant un courant-jet équatorial supersonique et des flux atmosphériques d'une complexité inédite. La planète en question, c'est Tylos, nom de code : WASP-121b. Découverte en 2015 à une distance comprise entre 685 et 897 années-lumière de nous, elle possède probablement de l'eau dans son atmosphère et constitue un véritable laboratoire de météorologie extrême.

Cette géante gazeuse est si proche de son étoile qu'une année y dure à peine 30 heures terrestres. Sur sa face éclairée, les températures peuvent monter jusqu'à 3000 °C alors que son côté obscur est exposé au froid de l'espace. C'est cette différence qui entraîne de violents flux entre chaque hémisphère. En analysant la lumière de la planète lors de son transit — son passage devant son étoile —, les chercheurs ont suivi la trace d'éléments chimiques tels le fer, le sodium et l'hydrogène à différentes altitudes, ce qui a permis de retracer les vents dans les couches profondes, moyennes et superficielles de l'atmosphère de la planète. Une prouesse réalisée grâce au Very Large Telescope (VLT) de l'Observatoire européen austral, au Chili. Les observations révèlent l'existence d'un courant-jet équatorial atteignant des vitesses de 25 km/s, soit près de 90 000 km/h — près de trois fois plus que le record de WASP-127b rapporté dans ces colonnes le mois dernier ! Ce flux agite violemment l'atmosphère très haut dans le ciel lorsqu'il traverse la face chaude de Tylos. *« Même les ouragans les plus violents du Système solaire paraissent calmes en comparaison »*, note dans un communiqué Julia Victoria Seidel, auteure principale de l'étude parue dans *Nature*.

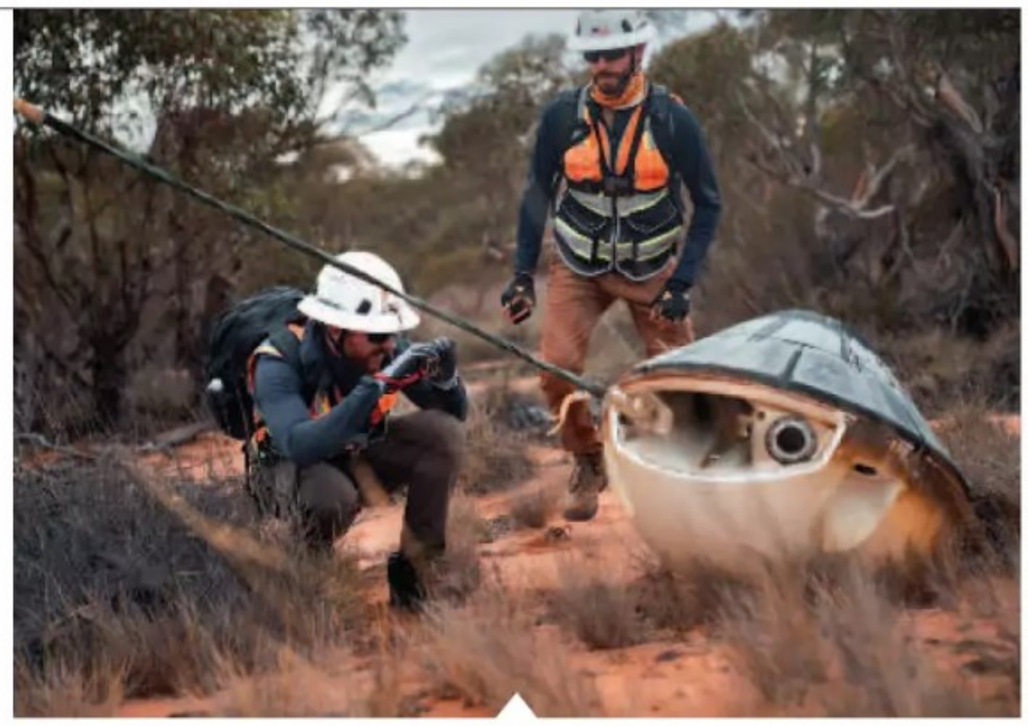
Une gigantesque machine météorologique

Un autre phénomène remarquable a été observé : un flux distinct, plus en profondeur, transporte la matière du côté exposé à l'étoile vers la face nocturne, où les températures sont bien plus basses. *« Cela remet en question les modèles actuels des atmosphères planétaires. WASP-121b semble fonctionner comme une gigantesque machine météorologique où des vents à différentes altitudes interagissent de manière inattendue »*, précise la chercheuse. Ces résultats marquent une étape clé dans l'exploration des atmosphères et des climats des exoplanètes. Mais pour aller plus loin et analyser des mondes rocheux semblables à la Terre, il faudra des télescopes encore plus puissants. L'Extremely Large Telescope (ELT), en construction au Chili, sera capable de détecter des signatures atmosphériques des exoplanètes potentiellement habitables. ■ **J. I.**

ESO/M. KORNMESSER

Des médicaments fabriqués dans l'espace

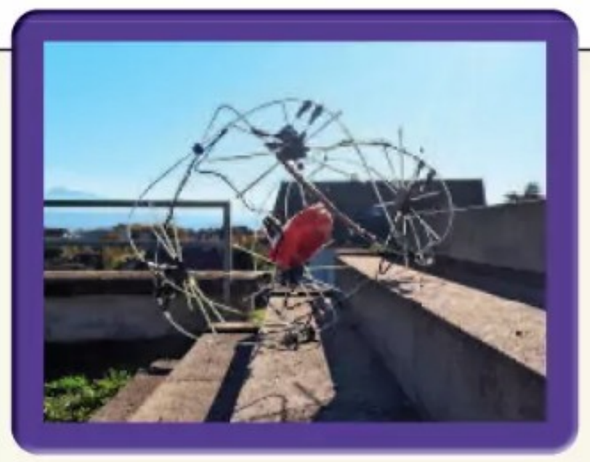
Une expérience dans une capsule spatiale a utilisé l'absence de gravité pour mieux contrôler une réaction chimique.



W. GODWIN/VARDA SPACE INDUSTRIES

La capsule contenant le réacteur pharmaceutique a été récupérée en Australie après six semaines en orbite.

Utiliser la microgravité pour faciliter la fabrication de molécules thérapeutiques, c'est l'objectif de la start-up américaine Varda Space Industries, dont une capsule spatiale expérimentale a pu être récupérée avec succès près de Koonibba, dans le sud de l'Australie. À bord de l'engin envoyé en orbite basse en janvier par une fusée SpaceX, se trouvait un réacteur pharmaceutique devant fabriquer une molécule exclusive du laboratoire dont la nature n'a pas été révélée. La première mission de cette entreprise de pharmaceutique spatiale lancée en juin 2023 avait réussi la fabrication du ritonavir, un antirétroviral utilisé contre le VIH. L'idée poursuivie est que l'absence de gravité et de convection permet de mieux contrôler les conditions expérimentales de façon à obtenir des cristaux plus purs. Depuis sa création en 2020, la start-up affiche pour objectif de construire à terme la première station spatiale dédiée à un usage industriel, en l'occurrence la fabrication de médicaments, mais aussi d'autres produits. **H. J.**



CREATE EPFL

À VOIR SUR LE NET

Goat, robot tout-terrain et protéiforme

ROBOTIQUE Cette armature en fibre de verre flexible mise au point par l'École polytechnique fédérale de Lausanne (Suisse) se déplace sur quatre roues. Selon les obstacles, elle peut se tordre en tous sens grâce à deux câbles actionnés par un moteur. Gyromètres et accéléromètres indiquent à un algorithme la nature du terrain, et non des caméras ou un radar, ce qui en fait une machine à la fois simple et très adaptable pouvant même progresser dans l'eau. **A. D.**

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

L'IA accélère le décodage des données sur ADN

BIOTECHNOLOGIE Une équipe israélienne a mis au point une intelligence artificielle, DNAformer, capable de décoder en un temps record les données numériques stockées sur des séquences ADN. Molécule extrêmement compacte et stable dans le temps, l'ADN est envisagé comme outil de stockage depuis plusieurs années. Mais le procédé se heurte à une récupération difficile des données. L'IA a permis de les décoder en dix minutes au lieu de plusieurs jours jusqu'ici. **H. J.**

SOURCE : DANIELLA BAR-LEV, INSTITUT DE TECHNOLOGIE D'ISRAËL.

0,001 %

Le risque que l'astéroïde 2024 YR4 percute la Terre

ASTRONOMIE Plus de peur que de mal concernant l'astéroïde 2024 YR4 : après avoir atteint environ 3 %, la probabilité de collision avec la Terre en 2032 a été ramenée à presque 0 par l'Agence spatiale européenne. Une bonne nouvelle puisque sa taille, comprise entre 40 et 90 m de large, serait suffisante pour détruire une ville. **F. N.**

Des scaphandres en hydrogel

MATÉRIAUX Des vols spatiaux de longue durée exposeraient les astronautes à des particules cosmiques et solaires potentiellement dangereuses (*lire aussi p. 26*). Pour les protéger, l'Agence spatiale européenne a conçu un nouveau type de combinaison malléable et léger à base d'hydrogels. Imprimés en 3D, ces matériaux contiennent des polymères très absorbants qui interagissent avec les rayonnements délétères. **F. D.**

J. DUBRUEL/ESA

▶ **Modèle miniature** d'un astronaute en hydrogel imprimé en 3D.

VIRGIN GALACTIC

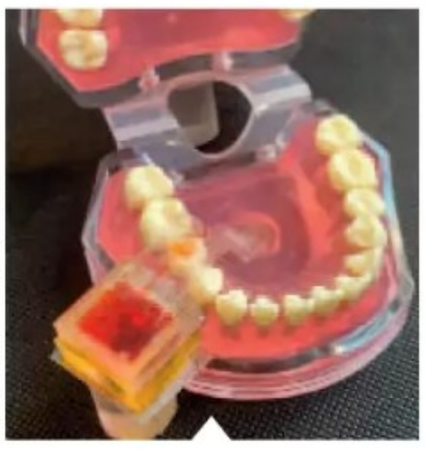
Un nouveau vaisseau spatial en construction

ESPACE Le premier vaisseau spatial Delta de Virgin Galactic devrait bientôt être assemblé près de Phoenix, en Arizona (États-Unis). Il inaugurera une nouvelle génération d'avions suborbitaux, propulsés par un moteur-fusée hybride, qui combine un oxydant liquide et un carburant solide. Après les vols d'essai, les vols commerciaux pourraient débuter à la mi-2026 en emportant d'abord des charges utiles de recherche, puis quatre à six passagers. En routine, les vaisseaux Delta voleront deux fois par semaine, contre une fois par mois pour le précédent vaisseau spatial VSS Unity. S. R.

Le sens du goût en réalité virtuelle

HIGH-TECH Une équipe a mis au point une langue électronique, sorte de languette en polymère se plaçant dans la bouche. La composition chimique d'un aliment convertie en données numériques est transmise à une pompe qui puise dans des réservoirs les cinq saveurs de base sous forme liquide et les envoie dans la languette. E-Taste peut ainsi restituer des goûts très simples lors d'une expérience en réalité virtuelle. **A. D.**

SOURCE : SHULIN CHEN, UNIVERSITÉ D'ÉTAT DE L'OHIO, ÉTATS-UNIS.



S. CHEN/OHIO STATE UNIVERSITY

Le système E-Taste envoie dans la bouche un hydrogel contenant des saveurs.

L'ISS est trop propre

ESPACE Les problèmes de santé (éruptions cutanées, dysfonctionnements immunitaires) des astronautes de la Station spatiale internationale (ISS) pourraient venir d'un environnement trop stérile, selon une étude des souches bactériennes présentes à bord. Elle suggère qu'introduire une plus grande diversité de microbes terrestres dans la station contribuerait à améliorer la santé humaine dans l'espace. **E. T.**

SOURCE : RODOLFO SALIDO, UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE, ÉTATS-UNIS.

IL A DIT

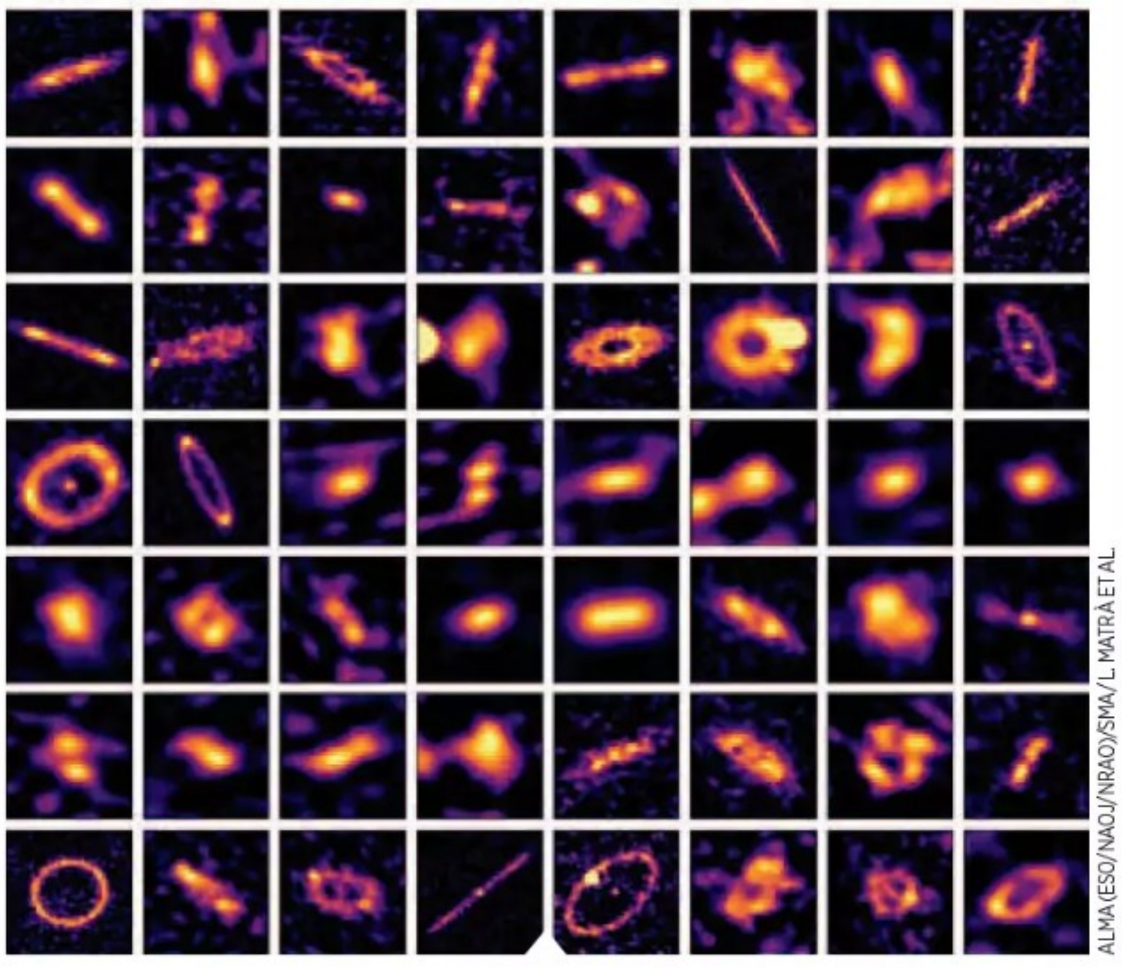
« Mars a rouillé plus tôt que prévu »

Adomas Valantinas, géologue à l'université de Berne (Suisse), résumant son étude qui montre que la poussière rouge-orangé donnant sa couleur à la planète Mars est un oxyde de fer hydraté de type ferrihydrite. Une sorte de rouille qui se forme au contact d'eau liquide bien plus rapidement que l'hématite.

Moisson inédite de ceintures d'exocomètes

Composées de blocs de roches et de glace, ces structures sont comparables à la ceinture de Kuiper dans notre système solaire.

Pour la première fois, 74 ceintures d'exocomètes, l'équivalent de la ceinture de Kuiper dans notre système solaire, ont été observées autour d'étoiles proches grâce aux interféromètres Alma (Chili) et SMA (Hawaii). Ces structures se composent de blocs de roche et de glace d'au moins 1 km de diamètre, mêlés à des fragments plus petits issus des collisions entre ces exocomètes. Le tout plongé dans des températures comprises entre -150 et -250 °C… Situées entre quelques dizaines et quelques centaines d'unités astronomiques (UA) de leur étoile (contre de 30 à 50 UA pour Kuiper), ces structures ont des formes variées, de l'anneau étroit au disque large, circulaires ou elliptiques. Leur diversité suggère l'influence gravitationnelle de planètes invisibles et révèle que notre ceinture de Kuiper, en forme de bouée, est loin d'être la norme. La ceinture « type » tendrait plutôt vers le disque plat. Selon cette étude, au moins 20 % des systèmes solaires posséderaient des ceintures de comètes à leurs confins. **F. N.**



ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/SMA/L. MATRÀ ET AL.

Les 74 structures observées autour d'étoiles proches présentent des formes et des tailles variées, du large disque à l'anneau étroit.

ARTHROSAMID

Une meilleure qualité de vie, sans chirurgie

Depuis 2022, le Professeur britannique Paul Lee, chirurgien orthopédiste, traite ses patients avec ARTHROSAMID®.
« En tant que chirurgien orthopédique ayant introduit ARTHROSAMID à la clinique Harley Street de Londres, et l'ayant largement utilisé depuis, j'ai constaté qu'il aidait de nombreux patients souffrant de douleurs au genou. En particulier lorsque d'autres types d'injections n'avaient pas fonctionné.
Contrairement aux traitements traditionnels qui se concentrent uniquement sur le cartilage et l'os, ARTHROSAMID® cible l'articulation en tant qu'organe en agissant sur la membrane synoviale. Dans ma pratique, cette nouvelle approche réduit la douleur, maintient la mobilité et procure un soulagement plus durable. Ce qui en fait une excellente option pour de nombreux patients »

Plus de 13 000 patients, à travers 15 pays, ont été soulagés par ARTHROSAMID®.

210 cliniques européennes ont intégré ARTHROSAMID® dans leurs protocoles de prise en charge de l'arthrose du genou.

1 injection = 4 ans d'efficacité.

ARTHROSAMID® est distribué en France par CJTPHARMA.

CJT PHARMA

Pour toutes informations :
contact@cjtpharma.fr

Qu'est-ce qu'ARTHROSAMID® ?

Communément appelé implant synovial, il s'agit d'un hydrogel constitué de 97,5 % d'eau et de 2,5% d'un polymère réticulé non particulaire . Cet implant bio-inerte, bio-stable et biocompatible permet d'agir efficacement contre l'arthrose du genou.

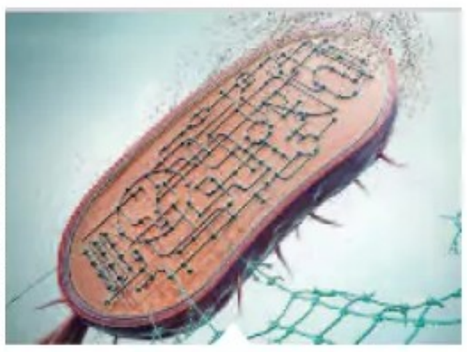
Comment agit ARTHROSAMID® ?

ARTHROSAMID est une injection intra-articulaire d'hydrogel de polyacrylamide. Une fois injecté dans la cavité articulaire, il rétablit la viscosité du liquide synovial, améliorant ainsi la lubrification et l'amortissement de l'articulation.
ARTHROSAMID® s'intègre également dans la membrane synoviale de la capsule articulaire, améliorant son élasticité. Ainsi la raideur, la douleur articulaire et l'inflammation sont réduites.

Les essais cliniques sont-ils probants ?

Dans une série d'essais cliniques menés au cours des 10 dernières années, il est démontré qu'ARTHROSAMID® entraîne :
- Une amélioration de la mobilité articulaire.
- Une réduction de la douleur.

De nouvelles données mettent en évidence des résultats significatifs à 4 ans, après une unique injection d'ARTHROSAMID®.
Dans ces études, les patients de moins de 70 ans ont fait état d'un taux de réponse positive de près de 80%.



SUSANNE HUSTED NIELSEN

« Pseudomonas putida » a été modifié pour digérer des polyamides.

Des bactéries OGM recyclent le Nylon

BIOTECHNOLOGIE Alors que le taux de recyclage des polyamides — ou Nylon — est aujourd'hui inférieur à 5 %, une équipe allemande a génétiquement modifié des bactéries *Pseudomonas putid*a, courantes dans les sols, pour les rendre capables de métaboliser ces plastiques et les transformer en biopolyesters biodégradables et compostables. **H. J.**

SOURCE : JAN DE WITT, CENTRE DE RECHERCHE DE JULIERS, ALLEMAGNE.

La culture du cannabis a une forte empreinte carbone

CLIMAT Chauffage, éclairage et injection de dioxyde de carbone pour fertiliser les plants… La culture sous serre du cannabis, en pleine expansion aux États-Unis, présente une empreinte carbone préoccupante. Les quelque 14 000 tonnes cultivées en intérieur consommeraient plus d'énergie que l'ensemble de l'agriculture en extérieur du pays, soit 595 millions de milliards de joules/an. **H. J.**

SOURCE : EVAN MILLS, UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE, ÉTATS-UNIS

Des gènes de mammouth pour une souris laineuse

Le rongeur présente désormais la même résistance au froid qu'un mammouth. Objectif : faire revivre des espèces disparues.

◀ **Pour obtenir** ces poils longs à la texture laineuse et cette couleur roux clair, les chercheurs ont modifié sept gènes à une souris.

COLOSSAL BIOSCIENCES/SIPA

Colossal Biosciences vient de franchir un nouveau cap dans son ambitieux projet de désextinction du mammouth laineux (*Mammuthus primigenius*). Le 4 mars, la société de biotechnologie a annoncé la naissance de souris génétiquement modifiées présentant des caractéristiques de résistance au froid similaires à celles des mammouths. Ces souris laineuses arborent un pelage plus épais et ondulé, une pigmentation rousse et un métabolisme lipidique modifié. La survie de ces chimères valide ainsi des techniques qui pourraient, à terme, être appliquées à d'autres espèces. Les chercheurs ont utilisé des données issues de 121 génomes de mammouths et d'éléphants d'Asie pour identifier les gènes impliqués dans les adaptations au froid. Ils ont ensuite appliqué des techniques avancées d'édition génomique, dont CRISPR-Cas9, pour introduire huit modifications sur sept gènes.

Restaurer la biodiversité de populations en déclin

Parmi les mutations majeures, l'inactivation du gène FGF5 a provoqué un allongement de la phase de croissance du poil, ce qui a généré une fourrure trois fois plus longue que chez les souris sauvages. D'autres modifications ont conféré aux poils une texture laineuse. Pour changer la couleur des souris, l'équipe a modifié le gène MC1R, responsable de la production de mélanine.

L'entreprise, qui ambitionne de « déséteindre » le dodo ou le tigre de Tasmanie, estime que ses recherches serviront aussi à la sauvegarde d'espèces menacées. *« Nous pouvons utiliser les mêmes techniques pour, par exemple, restaurer la biodiversité des populations en déclin et aider les espèces à devenir génétiquement résistantes aux maladies »*, estime Beth Shapiro, responsable scientifique du projet. Pour autant, de nombreuses difficultés parsèment la route vers la désextinction du mammouth. Et, si elles sont toutes franchies, ce ne sera pas l'animal disparu qui sera ressuscité, mais un hybride issu d'un ovocyte d'éléphante d'Asie, un peu plus gras et poilu qu'un éléphanteau. **J. I.**

L'énergie des courants océaniques révélée

OCÉANOGRAPHIE En s'appuyant sur plus de trente ans de mesures des courants océaniques de surface réalisées par l'Agence américaine d'observation océanique et atmosphérique (NOAA), une équipe a fourni l'évaluation mondiale la plus complète à ce jour de l'énergie cinétique des océans. L'étude révèle que les côtes est de la Floride et de l'Afrique du Sud présentent des densités de puissance supérieures à 2500 watts par mètre carré, soit 2,5 fois plus que celle d'une *« excellente »* ressource éolienne, selon les auteurs. **H. J.**

SOURCE : MAHSAN SADOUGHIPOUR, FLORIDA ATLANTIC UNIVERSITY, ÉTATS-UNIS.

3711 Le nombre de décès dus à la chaleur durant l'été 2024

CLIMATOLOGIE En France, la chaleur a tué plus de 3700 personnes — dont les trois quarts âgées de plus de 74 ans — pendant l'été 2024. Plus chauds d'un point de vue météorologique, les deux étés précédents avaient tué encore plus : 5167 décès liés à la chaleur en 2023 et 10 420 en 2022. **H. J.**

B. WILMS/MINDEN PICTURES/BIOSPHOTO

Les membres antérieurs d'« Odontodactylus scyllarus » sont recouverts d'une microstructure capable d'atténuer les chocs.

L'extraordinaire carapace de la crevette-mante

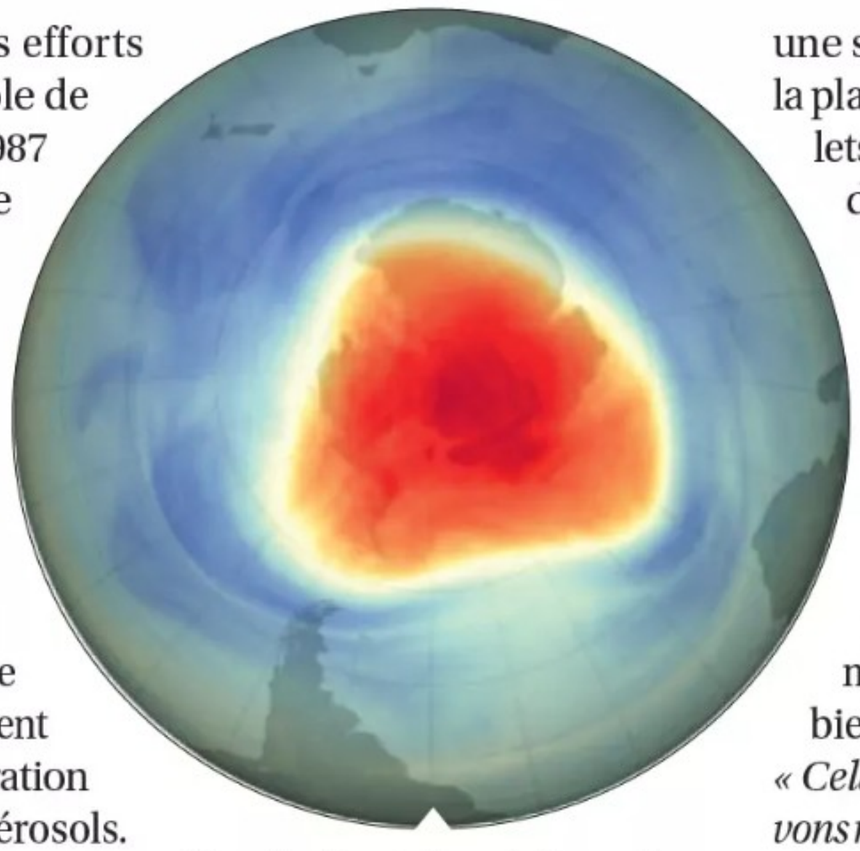
CARCINOLOGIE Des uppercuts suffisamment puissants pour briser la coquille des mollusques qu'elle déguste, voire fissurer la vitre des aquariums, c'est ce dont est capable la squille multicolore (*Odontodactylus scyllarus*). Et si son exosquelette ne souffre pas des chocs, c'est grâce à la microstructure d'une zone de 600 micromètres sur le bras-massue de la crevette, capable de dissiper les ondes de choc. **H. R.**

SOURCE : NICOLAS ALDERETE, UNIVERSITÉ NORTHWESTERN, ÉTATS-UNIS.

La guérison anthropique de la couche d'ozone

Une étude confirme que l'interdiction de gaz fluorés a permis la résorption du trou de la couche d'ozone.

Ce sont bien les efforts liés au protocole de Montréal de 1987 qui sont à l'origine de la résorption progressive du trou de la couche d'ozone. Ce traité international visait à éliminer progressivement la production des chlorofluorocarbures (CFC), une sous-classe de gaz fluorés notamment utilisés pour la réfrigération et les propulseurs d'aérosols. En remontant dans la stratosphère, ils dégradent l'ozone, un gaz naturel, lui, qui agit comme une sorte d'écran protégeant la planète des rayons ultraviolets du Soleil. L'étude publiée dans *Nature* par le Massachusetts Institute of Technology (États-Unis) montre pour la première fois que le rétablissement de la couche d'ozone observé ces dernières années n'est pas dû à des variations météorologiques, mais est bien d'origine anthropique. *« Cela montre que nous pouvons réellement résoudre les problèmes environnementaux »*, a déclaré Susan Solomon, coauteure de ces travaux. **H. J.**



NASA EARTH OBSERVATORY

Visualisation du trou de la couche d'ozone (en rouge) au-dessus du pôle Sud en septembre 2024 à partir de données satellitaires.

KAI SUN

Mesures du méthane émis par les différents plants de riz.

Une variante de riz anti-méthane

AGRICULTURE En entretenant au niveau de leurs racines des micro-organismes producteurs de méthane, les plants de riz sont d'importants émetteurs de ce gaz à effet de serre. Mais des chercheurs chinois viennent de rapporter la sélection de variétés dégageant 70 % de méthane en moins en plein champ et sans perte de rendement. **P. K.**

SOURCE : YUNKAI JIN, UNIVERSITÉ AGRICOLE DU HUNAN, CHINE.

CHRISTOPHE PERELLE/ BIOSPHOTO

La diversification des essences permet de faire face à l'incertitude climatique tout en éliminant le carbone.

Les loups d'Europe se portent bien

BIODIVERSITÉ En une décennie, les populations de loups en Europe ont augmenté de 58 %, selon une compilation des données sur les effectifs de *Canis lupus* de 34 pays européens. Une tendance favorable à mettre sur le compte des politiques de conservation : au moins 21 500 loups étaient ainsi répertoriés en 2022, date de fin des données exploitées. **H. J.**

SOURCE : CECILIA DI BERNARDI, UNIVERSITÉ SUÉDOIS DES SCIENCES AGRICOLES, SUÈDE.

Planter des arbres contre le réchauffement

CLIMATOLOGIE **Malgré la difficulté du choix des essences et du lieu adéquat, planter des arbres en quantité reste le moyen le plus rentable d'éliminer le carbone et d'atteindre l'objectif de zéro émission nette. C'est ce que montre une étude d'économie de l'environnement tentant d'établir un compromis entre la place de l'agriculture et celle des nouvelles surfaces boisées. Pour les auteurs, la trajectoire incertaine du réchauffement doit conduire à privilégier une diversification des essences (feuillus, conifères, etc.).** **H. J.**

SOURCE : FRANKIE CHO, UNIVERSITÉ D'EXETER, ROYAUME-UNI.

La carte magnétique des tortues marines

HERPÉTOLOGIE Migrateur emblématique, la tortue caouanne *(Caretta caretta)* est déjà connue pour s'orienter en fonction du champ magnétique terrestre au cours de ses longs périples océaniques. Mais une étude vient de montrer qu'en plus de ce compas interne, elle mémorise de véritables cartes de ses endroits de prédilection à partir de la signature magnétique naturelle d'une zone géographique d'intérêt, pour la ponte ou l'alimentation. **M. P.**

SOURCE : KAYLA GOFORTH, UNIVERSITÉ DE CAROLINE DU NORD À CHAPEL HILL, ÉTATS-UNIS.

FRANCO BANFI / BIOSPHOTO

« Caretta caretta » garde en mémoire les signatures magnétiques des endroits qu'elle préfère.

Le poisson-clown partage avec son anémone

Une nouvelle étude montre que ce poisson fournit de la nourriture à l'anémone de mer qui lui assure une plus grande descendance.

REINHARD DIRSCHERL / BIOSPHOTO

« Amphiprion clarkii », qui s'abrite chez l'anémone de mer, attache des palourdes sur ses tentacules afin de nourrir son hôte.

Un nouvel aspect du mutualisme qui unit le poisson-clown à son anémone de mer vient d'être mis en évidence par des chercheurs de l'université métropolitaine d'Osaka, au Japon. On savait déjà que les actiniaires offrent à ces poissons un refuge urticant et que ceux-ci chassent en retour les organismes qui grignotent leurs hôtes. La nouvelle étude montre que les poissons-clowns de Clark fournissent aussi de la nourriture à leur anémone en attachant aux tentacules de celle-ci les palourdes qu'ils ne peuvent manger. Pour la nourriture plus petite, ils se rassasient d'abord avant de leur donner les restes. En nourrissant son anémone, le poisson contribue en effet à la croissance de celle-ci. Or il a été montré que le nombre d'œufs pondus par certaines espèces de poissons-clowns est corrélé à la taille de leur hôte. Une anémone de mer bien nourrie assure ainsi au poisson-clown une descendance prospère. **S. R.**

22 %

La perte de papillons aux États-Unis

LÉPIDOPTÉROLOGIE **Selon l'analyse la plus complète à ce jour, reposant sur plus de 76 000 enquêtes, les États-Unis ont perdu 22 % de leur abondance totale en papillons entre 2000 et 2020. Sur les 554 espèces étudiées, 107 ont diminué de 50 %, dont 22 de plus de 90 %.** **L. M.**

SOURCE : COLLIN EDWARDS, UNIVERSITÉ D'ÉTAT DE WASHINGTON, ÉTATS-UNIS.

Sophia Boutique, la boutique des lecteurs de SCIENCES ET AVENIR

Offrez ou offrez-vous

Le Sac de Voyage transformable

Un concept révolutionnaire : permet de transporter costume ou robe sans les froisser et se transforme grâce à un jeu de fermetures éclair en un sac de voyage compact et pratique.

- **Housse rangement et protection vêtements intégrée :** parfaite pour costume, robes, tenues de soirée.
- **Compartiments Intelligents :** Ses poches intérieures et extérieures pour garder vos affaires organisées et facilement accessibles.
- **Confort de Transport :** Équipé de poignées robustes et d'une bandoulière ajustable, il offre un confort de port supérieur, vous permettant de voyager en toute aisance.
- **Matériau de qualité :** Toile en polyester 600D durable et ses attributs en simili cuir.
- **Dimensions idéales :** 50x30x25cm
- **Garanti 2 ans**

Le + La pochette de rangement à chaussures incluse

BON DE COMMANDE

À compléter et à renvoyer avec votre règlement sous enveloppe affranchie à :
SOPHIA BOUTIQUE
45, avenue du Général Leclerc
60643 Chantilly Cedex

	RÉF	QTÉ	PRIX	TOTAL
Le sac multifonctions	V220		54,90€	€
Frais d'envoi				OFFERTS
TOTAL DE MA COMMANDE				€

ADRESSE DE LIVRAISON

☐ M. ☐ Mme

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code Postal

Ville :

Téléphone

E-mail : @

Pour la bonne gestion de votre commande, merci d'indiquer votre email

☐ J'accepte de revoir des offres par email des partenaires de Sophia Boutique.

MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Je règle par chèque à l'ordre de : **Sophia Boutique**

☐ Je règle par carte bancaire

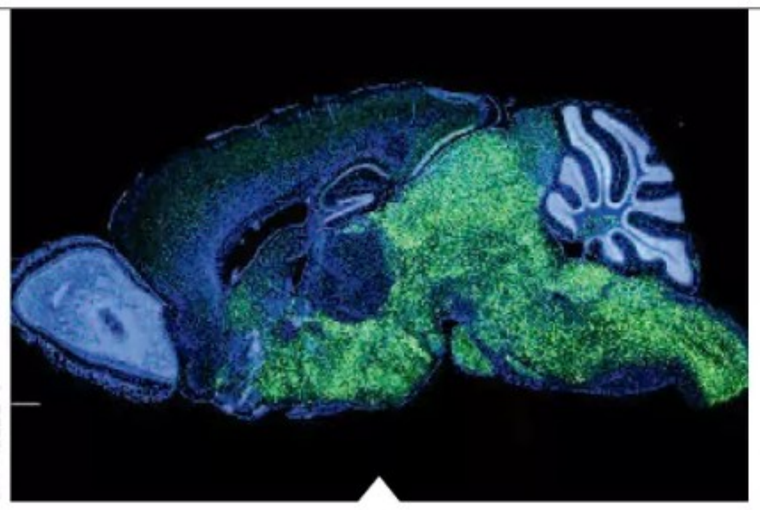
N°

Expirant le

Signature obligatoire :

Les Éditions Croque Futur situées au 41 bis avenue Bosquet, Paris 7e, et qui éditent Sophia Boutique sont responsables de traitement et collectent des données afin de servir votre commande. Vos données pourront être transmises à d'autres organismes (presse, VAD, caritatif) et sont conservées pour une durée de 3 ans à partir de votre commande. Vous pouvez exercer vos droits d'accès, de rectification, de limitation, de portabilité, d'opposition, d'effacement au traitement de vos données et définir vos directives postmortem à l'adresse mail suivante : dpo@sophiaboutique.fr en joignant une copie de votre carte d'identité. Les Éditions Croque Futur disposent d'un délégué à la protection des données pouvant être contacté au 41 bis avenue Bosquet, Paris 7e ou à l'adresse mail dpo@sophiaboutique.fr. À tout moment vous pouvez introduire une réclamation auprès de la CNIL.

PSCA938



DARNELL LAB

Un cerveau de souris dans lequel est exprimée la version humaine de Nova1 (en vert).

La protéine qui a façonné le langage humain

NEUROLOGIE Présente chez la plupart des mammifères, la protéine Nova1 se trouve sous une forme légèrement différente chez l'humain. Or, elle pourrait être à l'origine du langage complexe développé par notre espèce. En programmant génétiquement ce variant chez des souris, les chercheurs ont eu la surprise de voir que les souriceaux en parfaite santé couinaient différemment ! Nova1 avait modifié les neurones du mésencéphale qui codent pour la vocalisation. **C. G.**

SOURCE : YOKO TAJIMA, UNIVERSITÉ ROCKEFELLER, ÉTATS-UNIS.

Premier traitement « in utero » de l'amyotrophie spinale

PÉDIATRIE Cette maladie génétique responsable d'une atteinte musculaire progressive a été traitée pour la première fois au plus tôt, la mère ayant pris par voie orale durant sa grossesse le médicament risdiplam (Évrysdi). Cette stratégie a permis d'activer la fabrication de la protéine qui manquait à l'enfant. Aujourd'hui âgée de 2 ans et demi, celle-ci devrait toutefois poursuivre ce traitement récent à vie. **S. R.-M.**

SOURCE : RICHARD FINKEL, ST. JUDE CHILDREN'S RESEARCH HOSPITAL, ÉTATS-UNIS.

Oui à la vitamine D dans la sclérose en plaques

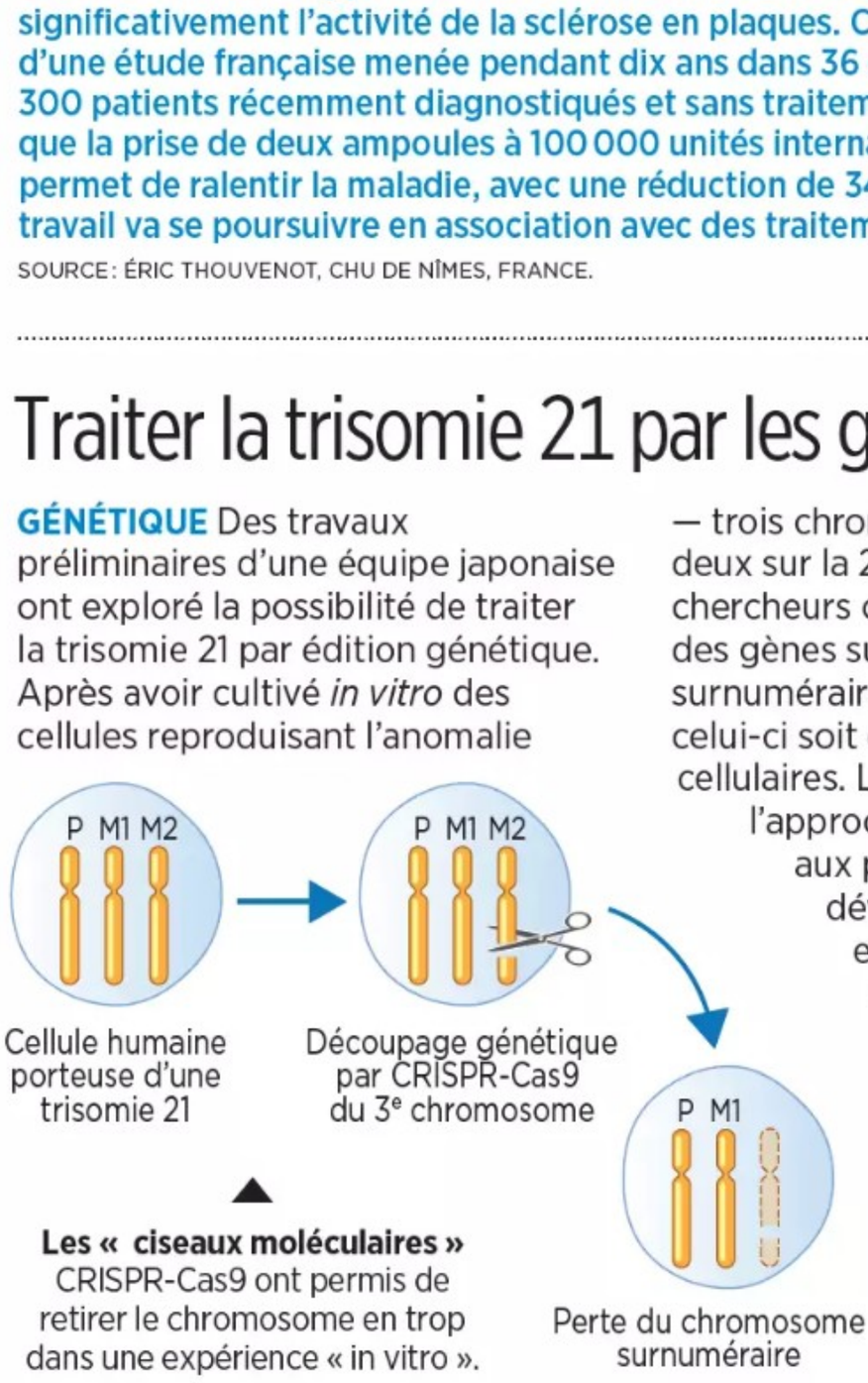
NEUROLOGIE La supplémentation en vitamine D à fortes doses réduit significativement l'activité de la sclérose en plaques. C'est la conclusion inédite d'une étude française menée pendant dix ans dans 36 centres auprès de 300 patients récemment diagnostiqués et sans traitement. L'essai démontre que la prise de deux ampoules à 100 000 unités internationales (UI) par mois permet de ralentir la maladie, avec une réduction de 34 % des poussées. Le travail va se poursuivre en association avec des traitements existants. **S. R.-M.**

SOURCE : ÉRIC THOUVENOT, CHU DE NÎMES, FRANCE.

Traiter la trisomie 21 par les gènes

GÉNÉTIQUE Des travaux préliminaires d'une équipe japonaise ont exploré la possibilité de traiter la trisomie 21 par édition génétique. Après avoir cultivé *in vitro* des cellules reproduisant l'anomalie — trois chromosomes au lieu de deux sur la 21e paire —, les chercheurs ont ciblé avec succès des gènes sur le chromosome surnuméraire pour empêcher que celui-ci soit copié lors des divisions cellulaires. Leur étude suggère que l'approche pourrait être testée aux premiers stades du développement embryonnaire, voire sur des cellules cérébrales chez des personnes atteintes du syndrome de Down (autre nom de la trisomie 21) pour en atténuer les troubles associés. **H. J.**

SOURCE : RYOTARO HASHYZUME, UNIVERSITÉ DE MIE, JAPON.



Cellule humaine porteuse d'une trisomie 21 — Découpage génétique par CRISPR-Cas9 du 3e chromosome — Perte du chromosome surnuméraire

Les « ciseaux moléculaires » CRISPR-Cas9 ont permis de retirer le chromosome en trop dans une expérience « in vitro ».

BRUNO BOURGEOIS - WWW.EUREKALERT.ORGMULTIMEDIA/1059628

J. MAISALMI

QUESTIONS À

Nicolas Kluger

Dermatologue à l'hôpital universitaire d'Helsinki (Finlande), également en charge de la consultation tatouages à l'hôpital Bichat, à Paris

« Il n'y a aucun lien solide entre tatouage et cancer »

Une étude danoise réalisée sur de vrais jumeaux suggère que le fait d'être tatoué augmenterait le risque de cancer. Des résultats inquiétants à prendre avec prudence, selon Nicolas Kluger.

Que pensez-vous de cette étude originale ?
L'étude est intéressante, car en analysant des paires de jumeaux, tatoués ou non, elle exclut toute influence des facteurs génétiques pour se focaliser sur l'environnement. Mais il y a des failles méthodologiques importantes. Par exemple, aucune donnée sur l'exposition au soleil des individus, facteur de risque pourtant essentiel du cancer de la peau.

Les tatouages ont-ils un impact sur l'immunité, comme le suggère l'étude ?
Elle part du constat bien connu que l'encre des tatouages peut migrer vers les ganglions lymphatiques, et se pose des questions quant à leurs effets possibles sur le système immunitaire. Mais elle ne présente aucune donnée montrant une immunité affaiblie des personnes tatouées.

Ils sont donc sans risque pour la santé ?
Il y a des risques avérés, comme des allergies à l'encre et des infections locales. Mais pour le cancer, jusqu'à présent, on n'a aucune preuve solide montrant un quelconque lien de causalité. ■

Propos recueillis par N. G. C.

L'effet anticancer de l'aspirine élucidé

Ce médicament perturbe l'activité d'un gène et permet de garder les cellules immunitaires en alerte contre les métastases.

V. BLANC / GETTY IMAGES

Le mécanisme des vertus antimétastasiques de l'aspirine, connues depuis 2010, vient d'être mis en évidence.

À faible dose, la prise d'aspirine diminue le risque que le cancer se répande — ce qu'on appelle des métastases. Si cet état de fait est connu depuis le début des années 2010, personne ne savait l'expliquer… jusqu'à présent. *« Au départ, nous n'étudiions pas spécifiquement l'aspirine »*, relate Rahul Roychoudhuri, immunologiste à l'université de Cambridge (Royaume-Uni), qui a dirigé ces travaux publiés dans *Nature*. À la recherche de facteurs génétiques permettant de réguler les métastases dans le cancer, son équipe identifie chez la souris un gène nommé ARHGEF1, dont la perturbation dans certaines cellules immunitaires réduit la fréquence des métastases. Or, ces cellules T sont un type de globules blancs notamment spécialisés dans la suppression des cellules anormales, comme les cellules cancéreuses…

Enrayer la production d'une protéine

« Le lien avec l'aspirine est apparu lorsque nous avons cherché à savoir quels signaux extracellulaires pouvaient activer ARHGEF1 dans les cellules T », relate Rahul Roychoudhuri. Les chercheurs identifient alors une molécule libérée par les plaquettes sanguines (qui permettent la coagulation), nommée thromboxane A2 (TXA2). Eurêka ! *« L'aspirine est connue pour inhiber la production de TXA2 »*, explique-t-il. C'est par ce biais que le médicament perturbe l'activité du gène ARHGEF1 et permet donc de garder les cellules immunitaires en alerte contre les métastases.

« Attention toutefois à ne pas prendre de l'aspirine sans l'avis de son médecin, alerte l'immunologiste. *Nos travaux n'ont pour l'instant été réalisés que sur la souris. Le moment, le dosage et la durée optimaux du traitement à l'aspirine pour prévenir les métastases chez l'humain restent incertains. »* Mais des essais cliniques sur le sujet sont en cours. ■ **C. G.**

Le « sexome » débarque en médecine légale

MICROBIOLOGIE Le microbiote génital, ou « sexome », est unique et pourrait servir à identifier les coupables de viols à la manière d'une empreinte digitale bactérienne, selon une étude menée auprès de 12 couples volontaires. L'analyse des bactéries génitales pourrait suppléer la méthode d'extraction d'ADN du sperme d'un criminel, parfois difficile, voire impossible. Des marqueurs microbiens pourraient permettre de détecter un contact sexuel, même en cas d'utilisation d'un préservatif. **C. G.**

SOURCE : RUBY DIXON, UNIVERSITÉ MURDOCH, AUSTRALIE.

BSIP

Les criminels peuvent être confondus par l'analyse de leurs bactéries génitales.

6034

Le nombre de greffes réalisées en France en 2024

CHIRURGIE L'activité de transplantation est désormais supérieure à ce qu'elle était avant la crise du Covid-19, selon le bilan publié par l'Agence de la biomédecine, qui a enregistré 401 greffes de plus qu'en 2023 (+7,1 %). **S. R.-M.**

Une IA lui a sauvé la vie

THÉRAPEUTIQUE Alors qu'il allait entrer en soins palliatifs, un patient atteint de la maladie auto-inflammatoire rare de Castleman a été sauvé *in extremis* par un traitement identifié par intelligence artificielle. Celle-ci a servi à passer au crible l'efficacité potentielle de 4000 molécules existantes en fonction de leur mode d'action et des caractéristiques de la maladie. Elle a sélectionné un anticorps monoclonal, l'adalimumab, indiqué habituellement pour l'arthrite ou le psoriasis... Le patient est en rémission depuis deux ans. **C. G.**

SOURCE : MÉLANIE MUMAU, UNIVERSITÉ DE PENNSYLVANIE, ÉTATS-UNIS.

« Aedes aegypti », insecte vecteur du virus Zika. ◀

BSIP

La peau infectée par Zika attire les moustiques

VIROLOGIE Pour attirer les moustiques vecteurs, le virus Zika induit un changement d'odeur de la peau humaine qu'il infecte, montre une équipe de chercheurs européenne. Plusieurs composés organiques volatils libérés en plus fortes quantités par certaines cellules infectées attirent les moustiques femelles et leur ouvrent l'appétit pour le sang. Cette manipulation s'ajoute à celle, indirecte et déjà connue, du microbiote épidermique par le virus, qui modifie aussi l'odeur de la peau. **P. K.**

SOURCE : RAIMONDAS MOZŪRAITIS, UNIVERSITÉ DE STOCKHOLM, SUÈDE.

S. KAULITZKI/SPL/SUCRÉSALÉ

Les contractions de cette grosse artère contribuent à faire circuler le sang (illustration).

L'aorte fonctionne comme un deuxième cœur

Des chercheurs ont mis en évidence un effet de pompage indépendant de celui du muscle cardiaque.

Le cœur n'est pas le seul organe impliqué dans la propulsion du sang. L'aorte, plus grosse artère de l'organisme, qui sort du ventricule cardiaque gauche et distribue le sang oxygéné dans tout le corps, possède des propriétés élastiques qui amortissent les variations de pression. Une équipe de l'université de Californie du Sud (États-Unis) vient de démontrer que son rôle est plus important encore. Grâce à des mesures réalisées par IRM sur des patients, ils ont mis en évidence un effet de pompage indépendant du cœur, produit par l'étirement et le relâchement de ce gros vaisseau sanguin. Un phénomène appelé « pompage par ondes » qui repose sur la capacité de l'aorte à stocker de l'énergie lors de la contraction du cœur (systole) et à la restituer durant sa relaxation (diastole). Il pourrait expliquer pourquoi certains cœurs fatigués parviennent à maintenir une circulation sanguine suffisante, l'aorte compensant en partie l'insuffisance cardiaque. **J. I.**

Comment le tardigrade se protège des radiations

BIOLOGIE La protéine Dsup pourrait permettre aux patients sous radiothérapie voire aux astronautes de se prémunir des radiations. Elle a été identifiée chez le tardigrade, animal connu pour sa forte résistance aux conditions extrêmes *(représentation ci-dessous)*. Dsup se lie en effet à l'ADN de façon à le protéger des cassures induites par les rayonnements. Exprimée chez des souris et des cochons lors d'expériences, elle a permis de réduire de 40 à 60 % les dommages provoqués par les radiations. **C. G.**

MIT

SOURCE : KIRTANE, MIT, ÉTATS-UNIS.

Un nouvel antidouleur non opioïde aux États-Unis

PHARMACOLOGIE L'agence américaine du médicament (FDA) vient d'autoriser le premier analgésique non opioïde depuis vingt ans. La suzetrigine, commercialisée par Vertex Pharmaceutical sous le nom de Journavx, bloque les signaux de la douleur d'une façon tout à fait inédite, et sans agir directement sur le cerveau, rendant le risque d'addiction quasi nul. **H. J.**

Découverte de la tombe de Thoutmosis II

Le tombeau du pharaon qui régna sur l'Égypte il y a 3500 ans vient d'être identifié à l'ouest de la Vallée des Rois.

C'était l'un des rares souverains de la 18e dynastie dont on n'avait pas retrouvé le tombeau. Le ministère égyptien du Tourisme et des Antiquités a annoncé que la tombe de Thoutmosis II avait été mise au jour à l'ouest de Louxor, près de la Vallée des Rois. Hélas, le tombeau est dans un très mauvais état de conservation, en partie à cause d'inondations ayant frappé la région peu après la mort du souverain. La trouvaille n'en reste pas moins importante : *« C'est la première fois que l'on découvre du mobilier funéraire appartenant à Thoutmosis II. Il n'en existe aucun dans les musées du monde entier »*, s'est réjoui Mohamed Ismail Khaled, secrétaire général du Conseil suprême des antiquités.

NATIONAL MUSEUM OF EGYPTIAN CIVILIZATION

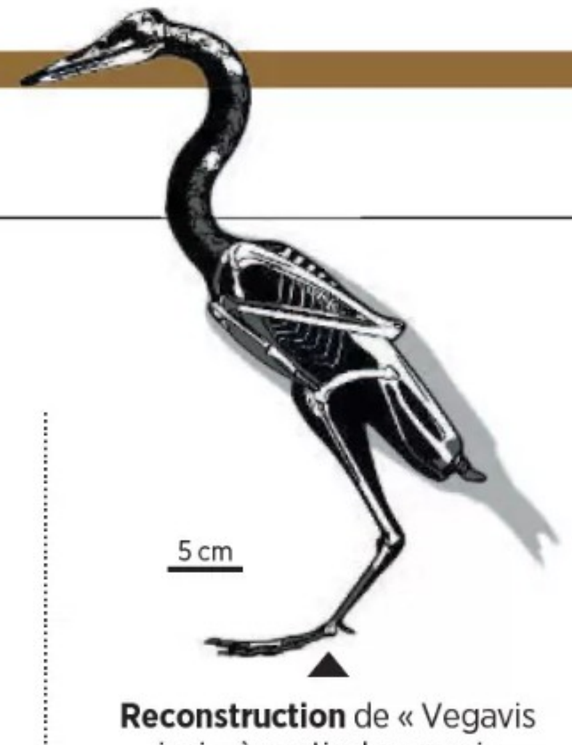
Des fragments de jarre portent son nom

Quelques artefacts se trouvaient en effet encore à l'intérieur du caveau, notamment des fragments de jarres en albâtre qui portaient des inscriptions des noms de Thoutmosis II et de sa principale épouse, la reine Hatchepsout. En revanche, la momie n'y reposait pas puisque la dépouille de Thoutmosis II, probablement déplacée par les rois-prêtres de la 21e dynastie pour la protéger des pillards, au même titre que ses objets funéraires, avait déjà été retrouvée en 1881 dans la cachette de Deir el-Bahari (DB320), située légèrement au sud du tombeau. Une identification qui aujourd'hui ne fait pas l'unanimité : la datation des os ne correspondrait pas à l'âge du souverain au moment de son décès.

Le règne de Thoutmosis II, relativement court (1492-1479 avant notre ère), marqua une période de transition entre celui de son père Thoutmosis Ier et celui, beaucoup plus influent, de son épouse et demi-sœur Hatchepsout qui devint régente puis pharaonne à part entière. Cette dernière fut l'une des rares femmes à avoir régné en tant que pharaonne d'Égypte.

L'équipe constituée d'archéologues égyptiens et d'experts de la New Kingdom Research Foundation au Royaume-Uni a découvert l'entrée de la tombe et son passage principal il y a près de trois ans. Le temps nécessaire pour s'assurer de la véritable identité de son occupant. ■ **M. B.**

◀ **La momie** de Thoutmosis II aurait été déplacée dans la cachette de Deir el-Bahari, située au sud du tombeau. Elle est exposée au Musée national de la civilisation égyptienne au Caire.



C. TORRES, UNIVERSITY OF THE PACIFIC

Reconstruction de « Vegavis iaai » à partir des os mis au jour (en blanc).

Un ancêtre des canards vivait en Antarctique au crétacé

PALÉONTOLOGIE Un crâne de *Vegavis iaai*, oiseau aquatique vieux de 69 millions d'années qui vivait en Antarctique, a été retrouvé sur le continent austral. Son analyse révèle que le volatile possédait un bec étroit et pointu, dépourvu de dents, et une mâchoire puissante adaptée à la chasse sous-marine. Son cerveau a une morphologie proche de celles des oiseaux modernes. Ce serait le plus ancien représentant des ansériformes, le groupe des canards, des oies et des cygnes. **J. I.**

SOURCE : CHRISTOPHER TORRES, UNIVERSITÉ DE L'OHIO, ÉTATS-UNIS.

L'histoire des Inuits révélée par l'ADN

ANTHROPOLOGIE Une étude en génétique des populations montre que les Inuits sont arrivés au Groenland il y a environ 1000 ans *via* l'Alaska, après avoir quitté la Sibérie. Isolés jusqu'au début des années 1960, ils ont acquis des mutations liées à une alimentation exclusivement carnée. Cette connaissance permettra de mieux dépister des pathologies propres à ce peuple, même si leur fréquence va diminuer avec le mélange actuel des populations. **P. K.**

SOURCE: FREDERIK F. STÆGER, UNIVERSITÉ DE COPENHAGUE, DANEMARK.

Télomères et longévité

En 2009, trois chercheurs américains se sont vu décerner le Prix Nobel de Médecine pour leurs travaux exceptionnels en biologie et génétique, qui ont permis la compréhension des mécanismes de protection de l'ADN au cœur des cellules.

Genèse d'une découverte

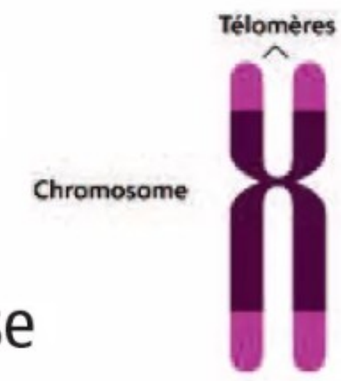
Le mot télomère vient du grec telos (fin) et meros (partie).

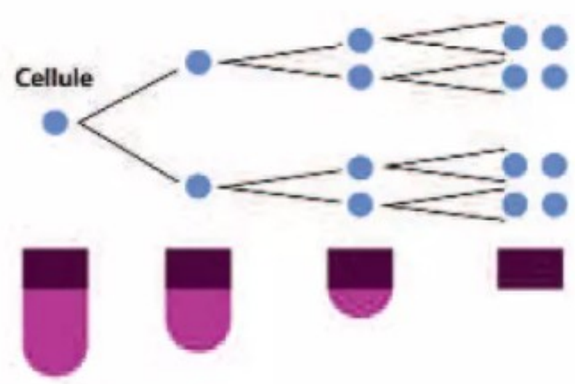
Dans les années 80, Elizabeth Blackburn est professeur de biologie à l'Université de Californie. Elle collabore avec Carol Greider, professeur de biologie moléculaire et Jack Szostak, professeur de génétique, afin d'étudier les mécanismes de protection et de réparation des chromosomes lors de la mitose cellulaire. Leurs travaux cherchent à expliquer comment les divisions cellulaires successives peuvent s'enchaîner sans que les chromosomes ne fusionnent entre eux ou ne s'abiment.

Mitose cellulaire et réplication des chromosomes

Les cellules de l'organisme se reproduisent régulièrement par un processus de division appelé mitose, la cellule initiale se scindant en deux cellules filles identiques qui contiennent le même matériel génétique. Il se produit pas moins de deux trillions de mitoses dans le corps humain chaque jour, ce qui permet de remplacer les cellules mortes ou abimées. Ce grand nombre fait supposer la survenue d'erreurs, c'est pourquoi les chercheurs ont émis l'hypothèse d'un système de protection des chromosomes.

Deux découvertes en une : télomères et télomérase





Les télomères raccourcissent à chaque division cellulaire

Situés aux extrémités de chaque chromosome, les télomères jouent un rôle de protection au moment de la séparation du matériel génétique. En effet à chaque division, ils raccourcissent légèrement, « sacrifiant » leur intégrité pour protéger celle des chromosomes. Le raccourcissement progressif des télomères finit par déclencher la fin du cycle de reproduction de la cellule, appelé sénescence. Les trois scientifiques ont également identifié une enzyme, baptisée télomérase, capable de rallonger les télomères et donc de prolonger la vie des cellules. Ils ont remarqué que cette enzyme n'était active que dans les cellules souches et germinales. Plus le nombre de de cellules sénescentes est grand, plus le vieillissement de l'organisme accélère : la longévité est donc directement liée à la longueur des télomères.

Astragale et télomères,

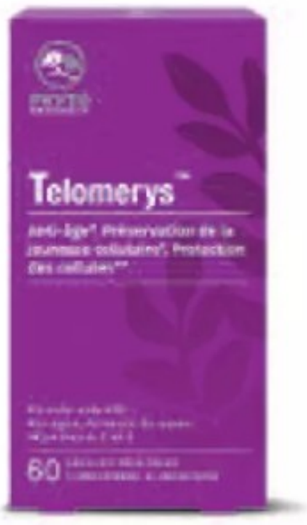
Des scientifiques se sont intéressés à la racine de l'Astragalus membranaceus, une petite fleur très utilisée en médecine traditionnelle comme tonifiant et immunostimulant. Ils ont mis en évidence que ses propriétés étaient dues à deux composés, appelés cycloastragenol et astragaloside IV, qui avaient la capacité de réactiver la télomérase dans les cellules. Après plusieurs années de développement, le laboratoire français PhytoResearch a mis au point une formule naturelle basée sur les résultats de ces avancées scientifi ques. Telomerys associe un extrait concentré de racine d'Astragalus membranaceus à du resvératrol, un puissant antioxydant, ainsi que des vitamines A, C et E. Formule anti-âge inédite, deux gélules par jour suffi sent pour constater une diminution signifi cative des rides, une amélioration des fonctions cognitives (mémoire, concentration) et un regain d'énergie.

Telomerys™

Préservation de la jeunesse cellulaire

Disponible en pharmacie

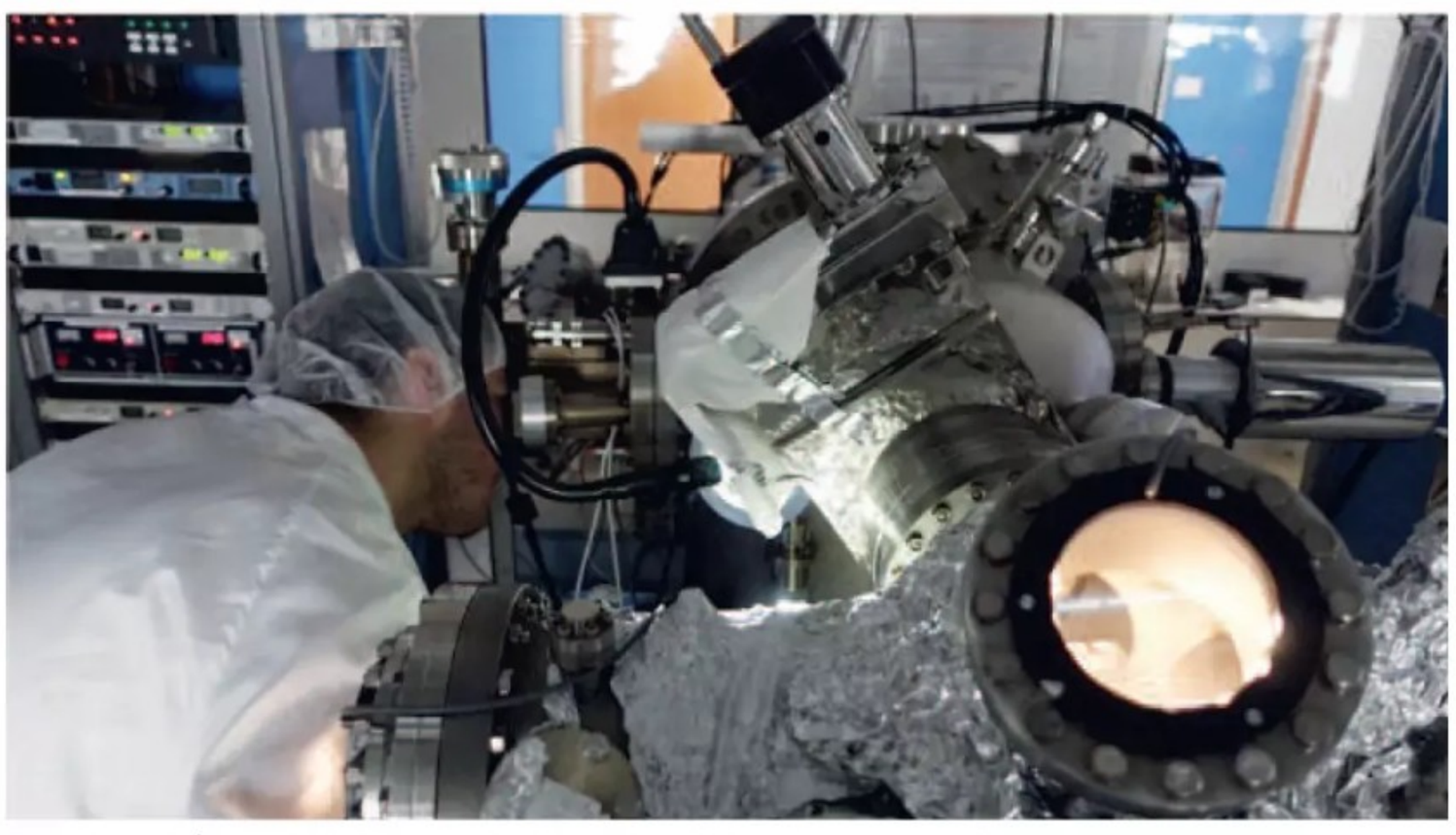
Telomerys 60 gélules végétales est disponible grâce au code ACL 602 42 56



Des conseils ?
Les experts du laboratoire PhytoResearch sont à votre écoute au **01 85 50 31 36** et sur www.telomerys.com

L'INL, les nanotechnologies au service des enjeux de la société

Sculpter et étudier la matière à l'échelle du nanomètre permet de créer de nouveaux systèmes d'ingénierie pour faire face aux défis contemporains de nos sociétés. Que ce soit pour la transition numérique, environnementale, énergétique ou encore la santé globale, la maîtrise des matériaux, de la lumière ou des électrons à leur échelle caractéristique, le nanomètre offre des potentialités fortes.



© INL

Réacteur d'Épitaxie à Jets Moléculaires (synthèse de nanomatériaux).

L'INL (Institut des Nanotechnologies de Lyon) est une Unité Mixte de Recherche (UMR) du CNRS, de l'INSA Lyon, de l'École Centrale de Lyon, de l'Université Claude Bernard Lyon 1 et de l'école CPE Lyon. Il compte plus de 200 personnes.

Ses recherches s'écrivent dans quatre grands défis sociétaux : la société numérique, la santé globale, la production d'énergie durable et la transition environnementale. Les nanotechnologies ne constituent pas une discipline mais une approche scientifique, qui se focalise sur les phénomènes propres à l'échelle du nanomètre. Les nanotechnologies étant naturellement pluridisciplinaires, l'ambition de l'INL est de mener des recherches fécondes à l'interface entre quatre disciplines majeures.

La première concerne la synthèse de nanomatériaux fonctionnels avec deux objectifs : le développement d'oxydes fonctionnels pour la production de carburant solaire par photocatalyse ainsi que la conception d'émetteurs semiconducteurs de photons pour les applications quantiques. Ces applications nécessitent de synthétiser des nanocristaux de qualité ultime. C'est pourquoi l'INL a développé une expertise en Épitaxie à Jets Moléculaires qui reste inégalée pour respecter ces contraintes.

La seconde discipline est celle de la photonique. Cette discipline vise à exalter l'interaction entre la lumière et les matériaux à l'échelle nanométrique. Pour ce faire, l'INL développe une stratégie allant des concepts fondamentaux, tels que le contrôle de condensats de Bose-Einstein dans les pérovskites semi-conductrices, les métasurfaces optiques ou le design de circuits topologiques photoniques fiables jusqu'aux applications. Parmi celles-ci, on peut citer les sources non linéaires dans le moyen IR nécessaires aux capteurs chimiques intégrés pour le monitoring de l'environnement, la conception et l'étude de cellules photovoltaïques à haut rendement en conditions réelles, les métasurfaces à base de matériaux à changement de phase pour les composants photoniques agiles et reconfigurables ou encore les cristaux photoniques pour la production d'hydrogène vert par photocatalyse exaltée.

Les actions de l'INL dans le domaine de la santé globale relèvent principalement des capteurs pour le suivi et le diagnostic à distance. Le concept est de déporter le diagnostic auprès du patient, ou de son médecin traitant, loin des structures de soin afin de permettre de réduire les coûts de santé tout en assurant un suivi en temps réel au plus près du patient. Pour répondre à cet enjeu, l'INL exploite en synergie ses compétences en bioingénierie, microfluidique et électronique embarquée pour concevoir des capteurs ultra-sensibles, miniaturisés et non invasifs, à bas coûts. Outre les capteurs, l'INL est également impliqué dans le développement d'organes sur puces, aptes à reproduire des organes humains afin de mieux comprendre certaines pathologies de l'intestin et de permettre une thérapie personnalisée.

La quatrième discipline identifiante de l'INL est la nano-électronique. Cette discipline est fortement stimulée par l'intelligence artificielle et l'internet des objets. Pour ces deux applications, l'enjeu est de disposer de puces électroniques frugales en énergie, fiables et protégeant les données gérées. Le concept retenu internationalement consiste à reproduire le fonctionnement du cerveau humain (composants neuromorphiques). À cette fin, l'INL développe la future génération de composants, à base de matériaux ferroélectriques ou à changement de phase. L'INL conçoit également des architectures de composants et de puces, robustes et frugales, fusionnant les fonctions de calcul et de mémoire pour reproduire le couple neurone-synapse nécessaire au calcul neuromorphique.

Pour mener à bien ces recherches, l'INL dispose de moyens de synthèse, de nano-fabrication et de nano-caractérisation à l'état de l'art. Ces moyens sont regroupés au sein de la plateforme Nanolyon, représentant 1 400 m² de plateau technique dont 600 m² de salles blanches (ISO5-ISO7). *Via* cette plateforme, l'INL mène ses recherches et les valorise en partenariat avec de nombreux acteurs industriels tant grands industriels majeurs de leur secteur que start-up innovantes.

Un fossile précise l'origine des oiseaux

Cette découverte en Chine suggère que les premiers volatiles seraient apparus plus tôt qu'on ne l'avait imaginé, dès le jurassique.

ZHAO CHUANG

« Baminornis zhenghensis » présente à la fois des caractéristiques primitives et modernes (reconstitution).

Voici 150 millions d'années, dans le district de Zhenghe (sud-est de la Chine), volait *Baminornis zhenghensis*, le plus ancien oiseau à queue courte connu ; il avait à peu près la taille d'un perroquet. Son fossile a notamment préservé un pygostyle, un os fusionné formant l'extrémité de la queue, caractéristique des oiseaux modernes tout comme ses ceintures pelvienne et scapulaire. Mais il possédait aussi une main primitive, proche de celle des dinosaures théropodes non aviaires. Une combinaison qui indique que *« différentes parties du corps évoluaient sous des pressions sélectives distinctes »*, explique Min Wang, un des paléontologues qui l'a étudié. Sa découverte suggère que les premiers oiseaux seraient apparus plus tôt qu'imaginé, au jurassique, sans doute il y a 172 à 164 millions d'années. Un autre os, une furcula, a aussi été découvert au même endroit et elle appartient à un autre animal : au moins deux oiseaux vivaient là en compagnie d'animaux semi-aquatiques et de tortues retrouvés en nombre. **J. I.**

PIER PAOLO PETRONE

Le cerveau vitrifié d'une victime du Vésuve

CHIMIE Découvert en 2020 à Herculanum (Italie) dans la boîte crânienne d'une victime de l'éruption du Vésuve en 79, ce morceau de tissu cérébral a été changé en verre sous l'effet d'une nuée ardente dépassant les 510 °C suivie d'un refroidissement rapide. Ce n'est qu'après que les coulées pyroclastiques ont fini de détruire la ville. **S. de L.**

SOURCE : PIERPAOLO PETRONE, UNIVERSITÉ DE NAPLES, ITALIE.

Les Nordiques en goguette sur l'île de Ré

ARCHÉOLOGIE L'Institut national de recherches archéologiques préventives (Inrap) a mis au jour à La Flotte, commune de l'île de Ré (Charente-Maritime), de rarissimes objets venus de contrées nordiques : deux peignes en os ou bois de cervidé, des perles en ambre, en verre et en alliage cuivreux et des boucles de ceinture métalliques décorées d'entrelacs. Trouvés dans cinq sépultures datées de la période carolingienne (VIIIe-Xe siècle de notre ère), ils constituent les tout premiers témoignages en contexte funéraire d'échanges entre les mondes franc et nordique. **M. B.**

P. ERNAUX, INRAP

Ce peigne trouvé dans une sépulture médiévale ressemble à des objets connus du monde nordique.

L'Égypte annonce l'ouverture de son grand musée

ÉGYPTOLOGIE Enfin ! Maintes fois repoussée, l'inauguration du Grand Musée égyptien du Caire (GEM), en Égypte, aura lieu le 3 juillet. Elle devrait s'étirer sur plusieurs jours et prendre la forme d'un événement d'ampleur *« mondiale »*, au cours duquel seront conviées des personnalités politiques. L'établissement sera donc ouvert dans son intégralité à cette date. **M. B.**

E. IMPERATO / CONTROLUCE / AFP

Les fresques représentant des scènes bachiques s'étalent sur trois murs.

À Pompéi, une salle de banquet sous le patronage de Bacchus

ARCHÉOLOGIE Des fresques monumentales représentant le cortège de Bacchus, dieu du vin, ont été mises au jour dans une salle réservée aux banquets à Pompéi. Décrite comme *« extraordinaire »*, cette mégalographie datée des années 40-30 avant notre ère représente les fameuses bacchantes, des chasseurs portant un chevreau égorgé ou une épée, ou encore de jeunes satyres aux oreilles pointues. **M. B.**

Les statues grecques étaient parfumées

ANTIQUITÉ La statuaire gréco-romaine n'était pas seulement peinte et ornée, mais aussi parfumée avec des huiles et substances aromatiques. C'est ce que révèle une nouvelle étude croisant des textes anciens et des traces relevées sur des œuvres d'un musée de Copenhague, au Danemark. L'une des techniques employées, appelée *ganôsis*, consistait à enduire les statues de cires et d'huiles permettant d'offrir une expérience olfactive tout en préservant leur surface et en les embellissant. **H. J.**

SOURCE : CECILIE BRØNS, GLYPTOTHÈQUE NY CARLSBERG, DANEMARK.

JIMBOB BLINKHORN, MPG

Outil en pierre découvert sur le site d'Anyama (Côte d'Ivoire actuelle).

« Sapiens » a aussi évolué dans des forêts tropicales

ANTHROPOLOGIE Les plus anciennes preuves d'occupation d'une forêt tropicale par notre espèce ont été identifiées en Afrique. Vieilles de 150 000 ans, elles repoussent de 80 000 ans le précédent record qui se situait en Asie du Sud-Est. Une surprise puisque ce type d'environnement est très peu hospitalier. Mais les outils découverts montrent que l'évolution humaine en Afrique s'est produite dans une grande variété de régions. **H. J.**

SOURCE : ESLEM BEN AROUS, INSTITUT MAX-PLANCK, ALLEMAGNE.

A. KHROBOSTOV/ALAMY/PHOTO12

La forteresse édifiée à Milan en 1460 par Francesco Sforza recèle des tunnels inexplorés depuis cinq siècles.

Le passage secret du château des Sforza

ARCHÉOLOGIE Il aura fallu 530 années pour confirmer la légende : le château des Sforza, au cœur de Milan (Italie), abrite bien sous sa structure un réseau de tunnels inexploré, comme l'avaient laissé entendre des croquis de Léonard de Vinci. À l'aide de radars à pénétration de sol (GPR) et de scanners, une équipe du Politecnico di Milano a révélé des structures situées à quelques dizaines de centimètres sous la surface. La fonction des tunnels aurait été tant militaire que personnelle. **M. B.**

B. ANDRÉ/HANS LUCAS; ALVARO HERRERO/UPY2025; INSTITUT DE MYOLOGIE; G. UGUETO/BENNETT ET AL.

L'actualité se poursuit sur Internet

www.sciencesetavenir.fr - www.larecherche.fr

MOBILISATION

Les chercheurs se lèvent pour la science

En réaction à l'élection de Donald Trump, des chercheurs américains ont lancé une mobilisation, Stand Up for Science. Entretien avec l'astrophysicien Olivier Berné, coorganisateur de la déclinaison française du mouvement : Stand Up for Science - France. À lire sur le site de *La Recherche*. bit.ly/4iAG2rD

PODCAST

« Sciences et Avenir » s'écoute

Les catacombes de Paris font peau neuve, les secrets du microbiote pulmonaire, les mystères de la Voie lactée révélés : voici quelques-uns des thèmes abordés dans notre podcast Sixième science qui réunit les journalistes de *Sciences et Avenir* et Romain Gouloumès de *20 minutes*. sciav.fr/podcast

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ...

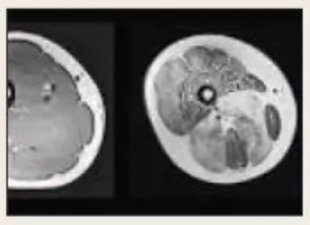
2 minutes

Les plus belles photos sous-marines

Baleines, épaves, plongeurs... Découvrez les photos sous-marines primées au concours Underwater Photographer of the Year. sciav.fr/938diapo

5 minutes

Les maladies neuromusculaires en images



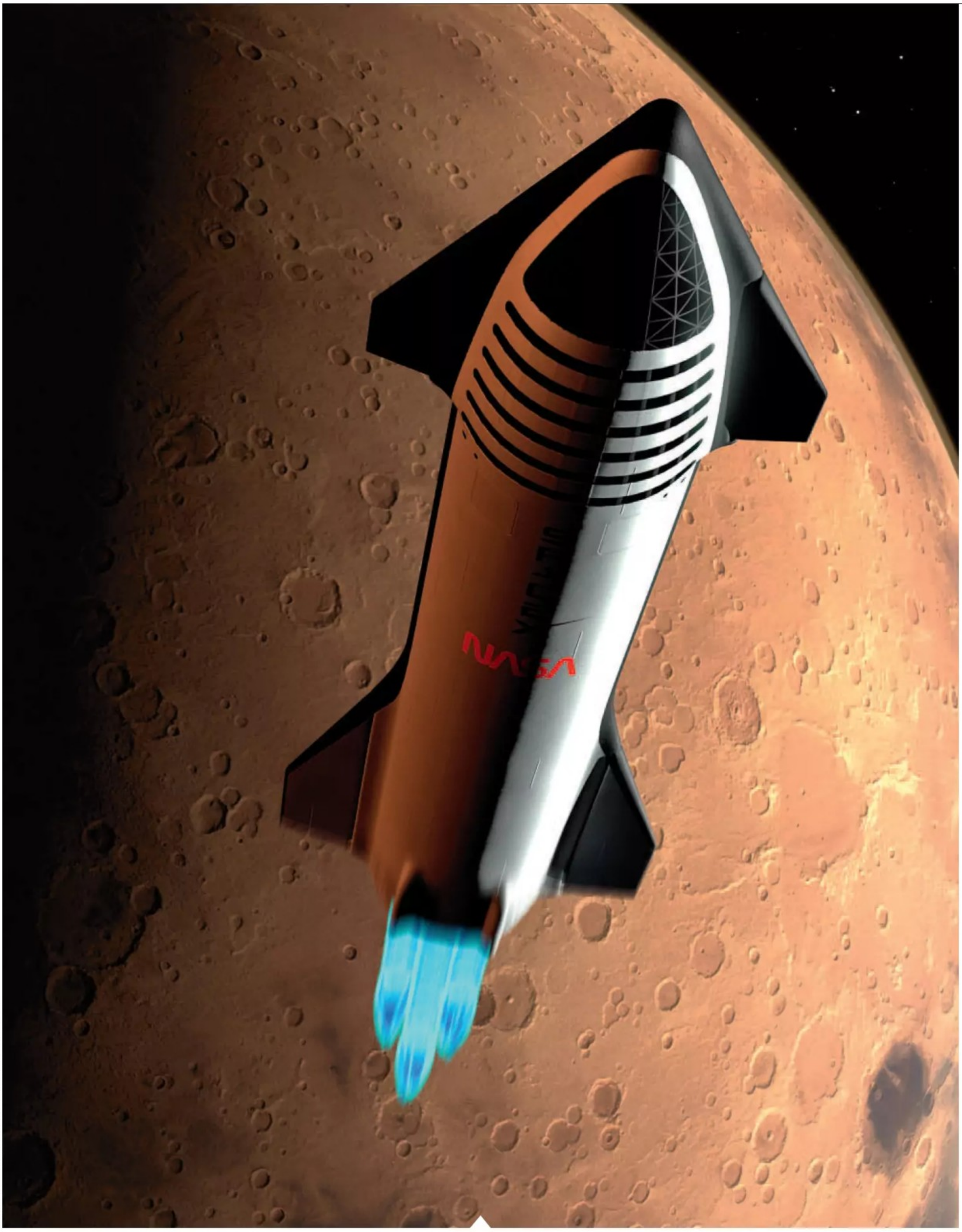
Reportage vidéo au cœur de l'Institut de myologie, centre d'expertise du muscle créé par l'AFM-Téléthon situé à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, à Paris. sciav.fr/938myo

10 minutes

Des travois de 20 000 ans en Amérique

Sur le site de White Sands (États-Unis), de mystérieuses lignes vieilles de plus de 20 000 ans témoignent du passage des plus anciennes traces de traîneaux tirés par des humains. sciav.fr/938travois

Vous êtes plus de 2 millions à nous suivre sur Facebook



MARK GARLICK/SCIENCE PHOTO LIBRARY/SUCRÉSALÉ

La mégafusée Starship pourrait se poser sur Mars dès 2026, a annoncé en septembre 2024 le patron de SpaceX Elon Musk, qui ambitionne de lancer une mission habitée deux ans plus tard (illustration).

Objectif Mars

Les défis d'un vol habité

Le projet du président américain d'envoyer des astronautes sur la planète Rouge avant 2029 est-il possible et réalisable ? Une gageure pour les spécialistes de l'exploration martienne interrogés par « Sciences et Avenir ». L'expertise préalable de vols habités vers la Lune sera nécessaire avant de pouvoir imaginer mettre un pied sur la lointaine Mars.

Par Franck Daninos

« *Nous poursuivrons notre destinée manifeste jusqu'aux étoiles, en envoyant des astronautes américains planter la bannière étoilée sur la planète Mars* », a martelé le président des États-Unis Donald Trump le 20 janvier lors d'un discours d'investiture aux accents impérialistes. Et ce « *avant la fin de mon mandat* », donc avant 2029, avait-il par ailleurs précisé pendant la campagne présidentielle. Cette promesse faisait elle-même écho au calendrier annoncé en septembre 2024 par son bouillonnant allié Elon Musk, patron de SpaceX désormais chargé de l'Efficacité gouvernementale : « *Les premiers vaisseaux seront lancés dans deux ans, lorsque la prochaine fenêtre de transfert Terre-Mars s'ouvrira, afin de tester la fiabilité d'un atterrissage intact sur Mars.* » Si les atterrissages se passent bien, les premiers vols avec équipage auraient alors lieu « *dans quatre ans* », claironnait l'homme le plus riche au monde.

Verra-t-on ainsi, d'ici à quelques années, les premiers humains fouler le sol de la planète Rouge ? Les projets et agendas avancés par le nouveau leadership américain sont-ils possibles et réalisables ? « *Je ne crois pas un seul instant que des astronautes, américains ou autres, poseront le pied sur Mars avant la fin de cette décennie,* assène Sylvain Chaty, astrophysicien à l'université Paris Cité. *Ce serait déjà une très bonne chose que les États-Unis tiennent leurs plannings pour le retour d'une présence humaine sur la* ▸

OLIVIER TOURON/AFP

Un prototype de rover est testé par la Nasa dans le désert d'Arizona (États-Unis), dans le cadre de futures missions avec équipage sur la Lune et sur Mars. ◀

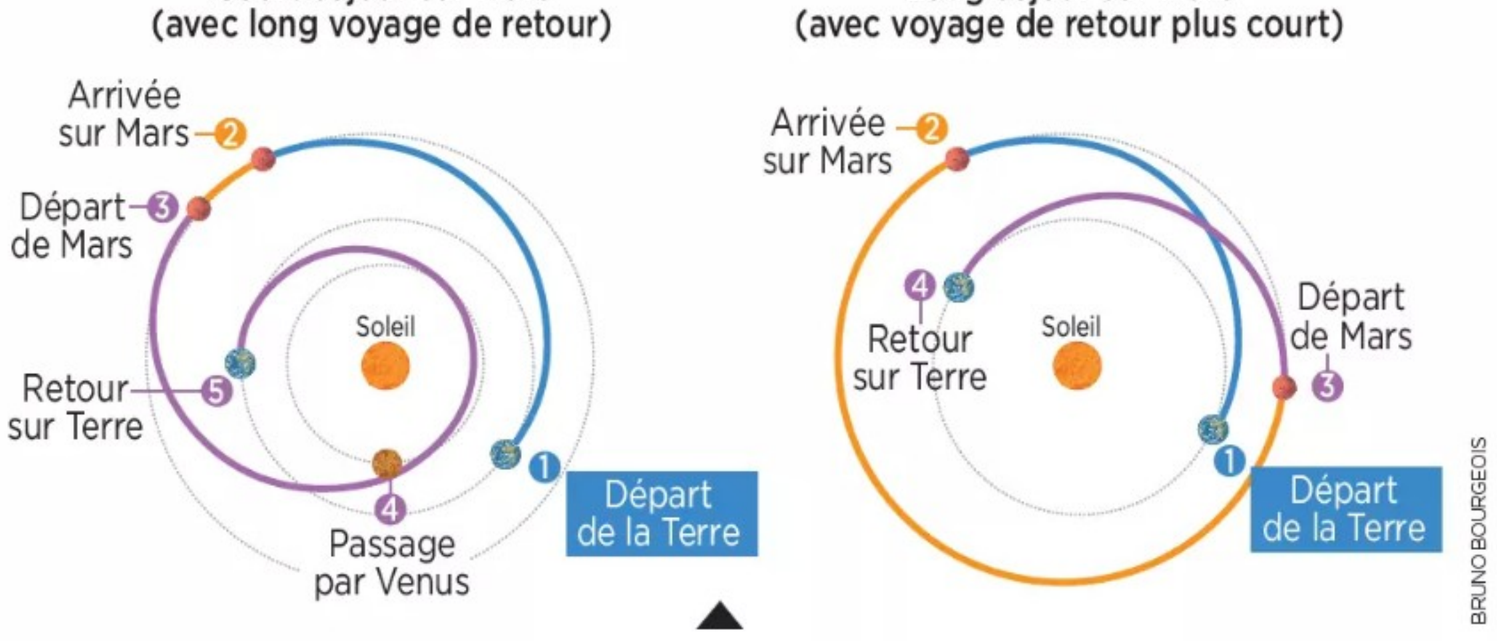
Lune avec la mission Artemis III », plusieurs fois retardée et programmée pour le moment en 2027. Sylvestre Maurice, de l'Institut de recherche en astrophysique et planétologie de Toulouse, qui a contribué à plusieurs missions d'exploration de Mars, est lui aussi très dubitatif: « *Elon Musk, personnage aussi clivant que provocateur, est certes un génie de l'entrepreneuriat et de la technologie qui a prouvé à plusieurs reprises que tout le monde avait tort, sur les lanceurs spatiaux réutilisables notamment. Mais le calendrier qu'il avance pour des vols habités vers Mars me semble totalement déconnecté de ce que les États-Unis, pourtant leaders dans l'exploration du système martien, savent faire aujourd'hui.* »

Difficile de se poser en douceur sur le sol martien

De fait, rallier la planète Rouge reste une gageure. Sur la cinquantaine de missions (sondes, orbiteurs, atterrisseurs, rovers) lancées vers elle depuis le début des années 1960, seule une moitié ont été couronnées de succès. Et parmi la vingtaine de tentatives d'atterrissage sur la surface gelée, ocre et désertique de Mars (la température moyenne avoisine les -60 °C), moins d'une dizaine ont réussi à éviter le crash. L'atmosphère martienne, 60 fois moins dense que sur Terre et composée à 96 % de dioxyde de carbone, pose en effet de grandes difficultés. « *Elle est trop fine pour qu'on y atterrisse uniquement avec de gros parachutes, comme sur Vénus, mais trop épaisse pour qu'on ralentisse au-dessus de la surface avec de simples rétrofusées, à l'instar de la Lune* », relève Sylvestre Maurice. Mars requiert ainsi des systèmes hybrides, et il demeure très difficile de s'y poser en douceur. Or, jusqu'à présent, aucune agence spatiale n'est parvenue à y faire atterrir plus de 2 tonnes de matériels, alors qu'une mission habitée nécessiterait une centaine de tonnes d'équipements pour permettre aux astronautes de se déplacer, respirer et bénéficier d'une source d'énergie. Sans oublier la fusée avec laquelle ils devraient repartir de la planète…

Car un vol habité implique nécessairement un voyage retour, qui n'a jamais été réalisé et complique énormément les choses. « *Aucun engin robotique n'a du reste jamais redécollé de Mars* », souligne Sylvain Chaty. Et là encore, cette planète

Les 2 scénarios de mission possibles selon la Nasa



BRUNO BOURGEOIS

À gauche : les astronautes ne resteraient que trois ou quatre semaines sur Mars mais le retour durerait 430 jours. **À droite :** le séjour martien serait de 550 jours avec un retour en 180 jours.

COURTESY OF JAMES WARD/H-SEAS

L'habitat Hi-Seas de la Nasa, installé à Hawaii (États-Unis) dans un environnement volcanique, permet de simuler des missions sur la planète Rouge.

pose beaucoup plus de difficultés que la Lune. La gravité est en effet trois fois plus forte que sur notre satellite naturel. S'en extraire requiert ainsi une poussée bien plus importante, davantage de carburant et donc une fusée relativement lourde. Entre 1969 et 1972, l'étage de remontée des missions lunaires Apollo faisait ainsi 2,8 mètres de hauteur, alors que pour Mars, selon les projections de la Nasa, il mesurerait 6 mètres de diamètre et jusqu'à 10 mètres de haut. *« Sur Mars, tout doit être démultiplié et plus gros »*, résume Francis Rocard, responsable du programme d'exploration du Système solaire au Centre national d'études spatiales (Cnes).

C'est d'ailleurs l'une des principales difficultés du programme Mars Sample Return de la Nasa, qui entend rapporter sur Terre 300 grammes d'échantillons de roches collectés depuis 2021 par le rover Perseverance. Pour l'heure, aucune solution n'a été entérinée pour la récupération, le décollage et le retour ici-bas de ces précieux « cailloux ». *« Selon la Nasa, rien ne pourra se faire avant au moins 2035,* indique Sylvestre Maurice. *Or,*

ENTRETIEN

MICHEL NICOLAS

PROFESSEUR DE PSYCHOLOGIE À L'UNIVERSITÉ BOURGOGNE EUROPE

M. NICOLAS

« Le facteur humain jouera un rôle primordial »

À quels défis psychologiques une expédition martienne serait-elle confrontée ?
Ils seraient nombreux et totalement inouïs. En raison, d'abord, de l'éloignement : jamais un groupe d'individus n'aura réalisé une expédition aussi lointaine, en étant coupés du reste de l'humanité pour un voyage spatial de deux ou trois ans… sans possibilité de retour anticipé en cas de problème ! Depuis Mars, notre planète apparaîtra en outre comme un petit point lumineux, une étoile parmi les autres : ce sera la première fois qu'un humain ne verra plus vraiment la Terre de ses yeux, et il est extrêmement difficile de prédire l'impact d'une telle situation. Les astronautes ne pourront du reste pas communiquer en temps réel avec le centre de contrôle, puisqu'à de telles distances, les délais de réponse peuvent se compter en dizaines de minutes. L'équipage devrait donc faire preuve d'une très grande autonomie face aux éventuels dangers, aléas et situations d'urgence, à une échelle jamais mesurée encore dans l'exploration humaine.

Comment favoriser l'adaptation des astronautes ?
Ils seront sélectionnés en premier lieu pour leurs aptitudes physiques et professionnelles, comme pour toutes les missions spatiales. Mais dans le cadre d'un long périple vers Mars, les dimensions psychologique et sociale joueront un rôle de premier plan. Depuis les années 1990, de nombreuses expériences simulant certains aspects d'un voyage martien dans des environnements dits isolés, confinés et extrêmes — au sein de la station polaire Concordia par exemple — ont pointé l'importance des compétences relationnelles, telles les capacités à communiquer, gérer les frustrations et exprimer ses émotions de manière socialement acceptable, afin d'éviter les conflits notamment. Les liens s'établissant autour de valeurs communes, l'exploration spatiale en particulier, seraient aussi très bénéfiques. Et il serait primordial de trouver un bon équilibre entre les charges de travail génératrices de stress, les périodes d'inactivité et des loisirs préférentiels — musique, photographie, etc. — favorisant la récupération et la santé mentale des astronautes. ■

Propos recueillis par F. D.

PHYSIOLOGIE

Quels dangers pour la santé des astronautes ?

Une mission habitée vers Mars exposerait les équipages à des risques inédits *« avec énormément d'inconnues »*, signale Marc-Antoine Custaud, professeur de physiologie au CHU d'Angers et expert médical pour le Cnes. Le premier danger concerne l'absence de gravité dans l'espace. *« Sur Terre, toute activité se fait en luttant contre cette force,* rappelle le médecin. *Sa suppression entraîne ainsi des déconditionnements qui favorisent eux-mêmes diverses pathologies.* » La pression artérielle est en effet moins bien régulée et des perturbations métaboliques apparaissent. Mais la microgravité produit aussi une décalcification osseuse et des atrophies musculaires, *« atteintes qui pourraient s'avérer très dangereuses lors d'un effort physique sur Mars »*, précise Marc-Antoine Custaud. Il existe certes des contre-mesures — exercices physiques dans le vaisseau interplanétaire, médicaments, vibrations pour recréer des impacts au niveau des os… Mais ces stratégies devront être repensées et adaptées à des vols spatiaux beaucoup plus longs que ceux réalisés jusqu'à présent ! L'exposition aux particules cosmiques et solaires très énergétiques, qui peuvent induire des mutations et des cancers, constitue un autre problème épineux. Là encore, plusieurs techniques permettraient d'atténuer les risques : blindage anti-radiations dans un compartiment du vaisseau, compléments nutritionnels à base d'antioxydants, etc. Mais les données manquent, tant sur les doses absorbées (estimées à 1000 millisieverts) que sur les meilleures façons de s'en prémunir. *« C'est un champ d'investigation qu'il faudra absolument consolider avant d'envisager une mission vers Mars »*, prévient Marc-Antoine Custaud.

▶ *Elon Musk parle de 2028 pour ramener de Mars des astronautes ! L'un des deux a forcément tort.* »

En 2022, l'Agence spatiale américaine a néanmoins présenté ce que serait l'architecture d'une mission martienne habitée. Il s'agissait de choisir d'abord entre deux scénarios, dits de conjonction et d'opposition *(voir l'infographie p. 28)*. La durée du voyage aller serait dans les deux cas la même : 180 jours environ, en profitant du plus court trajet entre la Terre et Mars (soit tout de même 400 millions de kilomètres), qui, en raison du mouvement de rotation des planètes autour du Soleil, s'ouvre tous les 26 mois. Dans le scénario de conjonction, le séjour sur Mars serait alors de 550 jours, afin d'attendre la fenêtre la plus favorable pour le voyage retour — de 180 jours également. Au total, cette odyssée durerait ainsi près de trois ans ! Dans le schéma d'opposition, les astronautes ne resteraient que trois ou quatre semaines sur Mars, ce qui réduirait significativement les contraintes techniques et logistiques (énergie, nourriture, oxygène, risques de panne, etc.) dans un milieu très inhospitalier (météorites, tempêtes de sable…). *« Le retour ne serait en revanche plus du tout optimisé,* explique Francis Rocard. *Il durerait 430 jours et nécessiterait un passage à proximité de Vénus, élevant à 40 ou 45 °C la température dans l'habitacle du vaisseau.* » Mais la mission s'achèverait au bout de 640 jours, abaissant ainsi le temps d'exposition aux rayonnements cosmiques et solaires potentiellement très dangereux *(lire l'encadré ci-contre)*. *« La Nasa a donc opté pour des séjours relativement courts sur Mars, au moins pour les premières échappées »*, indique l'expert.

Des engins convoyés dans des vaisseaux de 300 à 500 tonnes

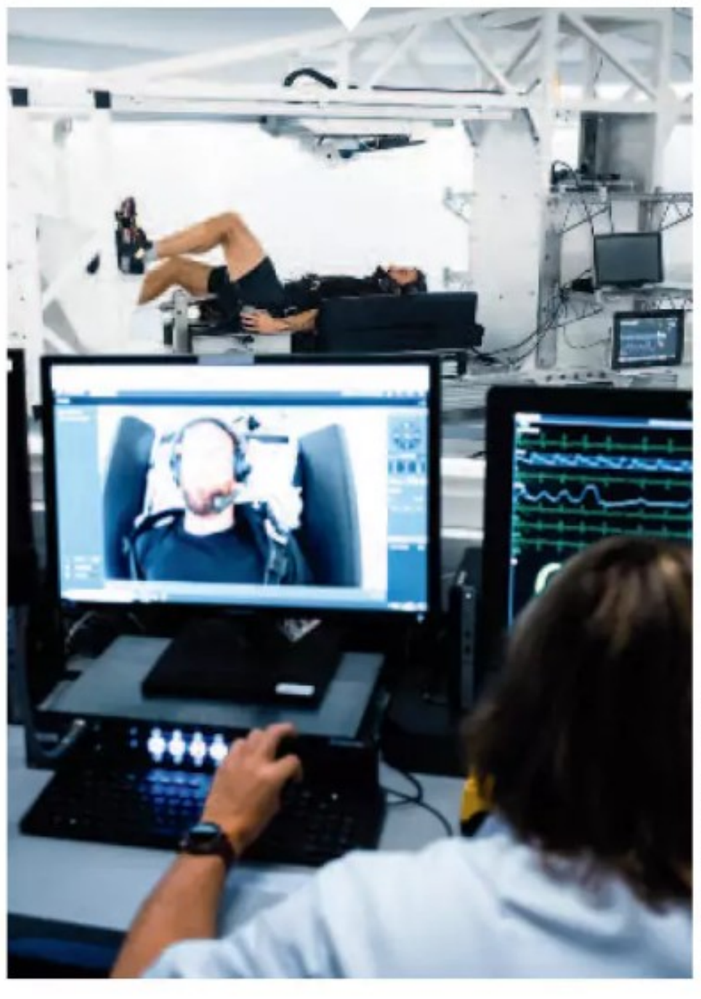
Même minimisés, les défis technologiques, psychologiques *(lire l'entretien p. 29)* et pour la santé humaine restent cependant phénoménaux, sans commune mesure avec une expédition lunaire. *« Il n'avait fallu que quelques jours aux astronautes d'Apollo pour réaliser un voyage complet,* rappelle Sylvain Chaty. *À 380 000 kilomètres de la Terre, les délais de communication étaient en outre de 2 secondes. Mais sur Mars, selon les configurations orbitales, il faudrait attendre de 6 à 44 minutes avant de recevoir une réponse !* » en cas de problème au redécollage, par exemple.

Selon les plans actuels de la Nasa, de gigantesques vaisseaux de 300 à 500 tonnes, peut-être à propulsion nucléaire (technologie actuellement à l'étude), seraient en outre nécessaires pour convoyer vers Mars une panoplie d'engins. Parmi eux : un cargo contenant 25 tonnes d'ergols cryogéniques (*a priori* du dioxygène et du méthane liquide), la fusée servant au redécollage et un petit rover transférant de l'un vers l'autre le carburant. Un véhicule pressurisé de 6 mètres de long

MEDES

Les effets de l'apesanteur sur le corps humain ont été testés auprès de volontaires au cours de l'étude Vivaldi menée en 2022 pour l'Agence spatiale européenne.

Un volontaire teste les effets du pédalage pour contrer l'impact négatif de 2 mois passés en position allongée en apesanteur.

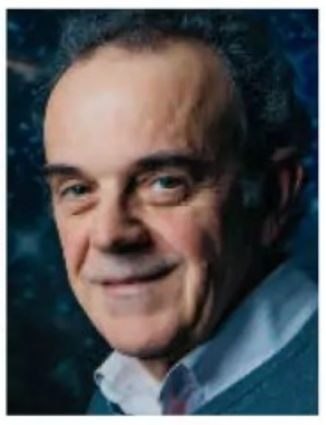


ADRIEN NOWAK/HANS LUCAS

serait ensuite déposé à proximité. Si tout se passe comme prévu, un équipage de quatre astronautes s'envolerait alors vers la planète Rouge. Deux d'entre eux utiliseraient un module de descente pour atterrir, avant d'arpenter la surface et d'intégrer le rover pressurisé, tandis que les deux autres resteraient en orbite martienne. *« C'est dans cette astromobile, qui servirait à la fois d'habitat, de véhicule et de laboratoire scientifique, que les astronautes séjourneraient pendant quatre semaines sur Mars »*, précise Francis Rocard.

Voilà donc… pour la théorie. Mais force est de constater qu'aucune de ces composantes — vaisseau interplanétaire, rover pressurisé, véhicule de remontée, mini-centrale nucléaire, etc. — n'est pour le moment opérationnelle. La mise en œuvre d'une mission martienne habitée, par ailleurs, se ferait nécessairement par étapes, comme jadis avec le programme Apollo et aujourd'hui Artemis. *« Un premier jalon consisterait à envoyer vers Mars un vaisseau lourd, du type Starship de SpaceX ou un autre, sans s'y arrêter puis à le faire revenir, afin de tester et qualifier ce mode de transport »*, pose Francis Rocard. Un voyage similaire pourrait être envisagé dans un deuxième temps avec un équipage. Puis dans un troisième, une mise en orbite martienne pendant quelques semaines. Les équipements robotiques seraient déposés ensuite lors d'un quatrième volet, afin de préparer, ultérieurement, l'atterrissage d'un couple d'astronautes.

Or, ces jalons successifs ne peuvent être réalisés que tous les 26 mois quand s'ouvrent de nouvelles fenêtres de tir, sans compter les délais de réaction et d'ajustements nécessaires à chacune des étapes ! *« Elon Musk n'a pas de baguette magique,* tance Sylvain Chaty. *Les contraintes orbitales sont ce qu'elles sont, et c'est notamment pour cette raison que le calendrier qu'il avance est totalement illusoire.* » Le programme Artemis devrait rester ainsi un objectif intermédiaire mais stratégique *« jusqu'à la fin des années 2030 »*, estime Francis Rocard, afin de valider certaines technologies clés (comme le rover pressurisé ou le mini-réacteur nucléaire) qui *« serviront aussi bien sur la Lune que sur Mars »*. On assisterait ensuite à une bascule progressive vers les premières missions martiennes. Pour toutes ces raisons, les premiers pas humains sur Mars semblent difficilement envisageables *« avant au mieux 2040 »*, soutient le chercheur.



J. FAURE/LEEXTRA/OPALEPHOTO

« Un premier jalon consisterait à envoyer vers Mars un vaisseau lourd sans s'y arrêter puis le faire revenir, afin de tester ce mode de transport »

Francis Rocard, responsable du programme d'exploration du Système solaire au Centre national d'études spatiales (Cnes)

Elon Musk : une obsession martienne

Le fondateur de SpaceX affiche son ambition : envoyer l'humanité coloniser la planète Rouge d'ici à vingt ans. Mais son nouveau pouvoir auprès de Trump et ses prises de position radicales pourraient desservir ce projet *(lire l'édito p. 5)*.

Le 15 janvier 2024, au Centre national d'études spatiales (Cnes), à Paris. L'Américain Robert Zubrin délivre au pupitre sa vision de la conquête de la planète Rouge ; c'est l'obsession du fondateur de la Mars Society. Cette organisation internationale (dont la branche française est l'Association Planète Mars) créée en 1998 promeut, auprès des experts, des gouvernements et du grand public, l'exploration et la colonisation de Mars par des humains. Mais ce projet, désormais, ce n'est plus Robert Zubrin qui l'incarne. La place est prise par un ancien membre de l'association, le plus célèbre (même si elle a compté en son sein le réalisateur d'*Avatar* James Cameron) : le controversé Elon Musk.

Durant sa visite à l'Agence spatiale française, Robert Zubrin résume en une phrase la méthodologie des ingénieurs de SpaceX, l'entreprise spatiale privée d'Elon Musk : *« Ils décollent, s'écrasent, découvrent ce qui n'a pas fonctionné, le réparent, redécollent et vont un peu plus loin dans le domaine de vol. De tir en tir, cela finira par marcher. »* De quoi ouvrir la voie à l'avènement *« d'une classe de véhicule qui nous place dans le domaine des charges utiles permettant l'exploration humaine »* de la planète Rouge. De fait, c'est par le truchement de la Mars Society qu'Elon Musk a contracté cette certitude : il doit être possible d'envoyer l'humanité sur la planète voisine de la Terre. En 2001, il devient membre du conseil d'administration de l'association. Il se passionne un temps pour un projet de Robert Zubrin qui consisterait à mettre des souris dans une capsule en orbite de la Terre où serait simulée la gravité martienne. Déjà, Elon Musk voit plus loin : lui veut carrément envoyer les souris sur Mars !

Elon Musk quitte néanmoins rapidement l'association pour se concentrer sur ses propres projets spatiaux et la fondation de SpaceX. Pour l'entreprise qui incarne le *New space* et la privatisation de la conquête spatiale, l'obsession martienne n'est pas une tocade apparue

CHIP SOMODEVILLA / AFP

Elon Musk.

Alors pourquoi, si tous les experts s'accordent à dire que l'échéance de 2029 est impossible à tenir, formuler pareille promesse ? *« Plusieurs phénomènes se télescopent dans un contexte de guerre d'ego et d'un monde qui se fracture »*, analyse Sylvestre Maurice. Pour Donald Trump, Mars sert tout autant à réactiver les mythes de la dernière frontière et de la destinée manifeste des États-Unis qu'à réaffirmer leur supériorité technologique. Et chercher peut-être aussi un « effet Kennedy », à l'instar de l'objectif fixé en 1961 par le président éponyme de planter avant 1970 la bannière étoilée sur la Lune, afin de reconquérir le prestige américain dans le contexte de la guerre froide avec l'Union soviétique.

400 milliards de dollars pour une mission habitée

Quant à Elon Musk, obnubilé par la conquête de Mars depuis le début des années 2000 *(lire ci-contre)*, *« les calendriers ultra-ambitieux ont toujours été sa marque de fabrique »*, insiste Francis Rocard. Il fixe des échéances très rapprochées pour créer des dynamiques, exercer une pression phénoménale sur ses équipes d'ingénieurs et attirer des crédits à court terme. Or *« le développement d'une mission martienne habitée devrait coûter 400 milliards de dollars »*, observe l'astrophysicien, quatre fois plus qu'Artemis. Une telle manne assurerait *« l'avenir du programme américain de vols habités, unique au monde par son ampleur »* (10 milliards de dollars par an depuis l'époque d'Apollo), alors que la Station spatiale internationale sera mise à la retraite en 2030. Elle permettrait de maintenir ainsi de nombreux emplois aux États-Unis et alimenterait de grands groupes industriels tels Boeing, Lockheed Martin… et, bien sûr, SpaceX. ■

La mégafusée Starship a été conçue par SpaceX dans le but d'atteindre Mars (vue d'artiste). Les ouvrages de science-fiction traitant de la conquête de la planète Rouge par les humains ont largement nourri les projets d'Elon Musk.

MARK GARLICK/SPL/SUCRÉ SALÉ - COLL. MAISON D'AILLEURS / AGENCE MARTIENNE-

en chemin : c'est le projet consubstantiel, présent dès que SpaceX est portée sur les fonts baptismaux en 2002 (et plus tard incarné dans le slogan de l'entreprise « Making life multiplanetary », « Rendre la vie multiplanétaire »).

À cette époque, Elon Musk est devenu multimillionnaire grâce à la vente à eBay de la société PayPal dont il était l'un des créateurs. Il décide alors d'investir sa fortune dans de nouvelles activités industrielles qui doivent permettre de façonner sa vision du futur. Elle est focalisée sur l'espace. Enfant, il s'est nourri de lectures de science-fiction. BD ou romans, elles ont été le havre de paix d'un jeune Sud-Africain en butte au monde extérieur (Elon Musk a déclaré voici quelques années être atteint du syndrome d'Asperger). Cet imaginaire est aujourd'hui comme une feuille de route programmatique : la Falcon de SpaceX porte ce nom en hommage au Millennium Falcon, le véhicule d'Han Solo dans *Star Wars*, et ces fusées réutilisables réatterrissent parfois sur des barges flottant sur l'océan et baptisées *Of course I still love you* et *Just read the instructions*, cette fois un emprunt aux noms des vaisseaux dans le *Cycle de la culture*, série de romans de l'Écossais Iain M. Banks et référence littéraire chez les fans de science-fiction.

L'influence est aussi à chercher du côté de l'histoire de la conquête spatiale soviétique : Elon Musk a fait sienne la devise de Constantin Tsiolkovski, selon laquelle *« la Terre est le berceau de l'humanité, mais on ne passe pas sa vie entière dans un berceau »*. Théoricien russe du début du XX^e^ siècle, Constantin Tsiolkovski est considéré comme l'un des pères de l'astronautique moderne. L'œuvre du savant a été déterminante dans l'art de propulser les fusées ; il a formulé l'équation fondamentale du mouvement spatial qui porte son nom. Penseur du « cosmisme », Constantin Tsiolkovski estimait que le destin de l'humanité s'écrirait dans l'espace ; Elon Musk est sur la même longueur d'onde. Son tropisme russe apparaît aussi à la naissance de SpaceX quand il a essayé d'acheter des lanceurs démilitarisés à l'ex-URSS (expérience avortée qui l'incitera à construire de A à Z ses propres fusées).

Le temps réel et celui de Musk sont rarement compatibles

Si le voyage vers Mars est pour le milliardaire américain un enjeu civilisationnel, il prend littéralement le contrepied d'un slogan ayant fait florès pendant la COP21 de Paris : *« Il n'y a pas de plan B parce qu'il n'y a pas de planète B. »* Pour le patron de SpaceX, la planète Rouge est précisément le radeau de sauvetage d'une humanité qui a carbonisé sa propre maison. Un point de vue évidemment polémique puisqu'il apparaît comme une fuite en avant : au lieu de promouvoir le sauvetage de la Terre, ce projet accélère son affaiblissement. Elon Musk n'en a cure, lui qui prophétise que d'ici à vingt ans il aura permis qu'un million de personnes s'établissent sur Mars.

Mais le temps réel et celui d'Elon Musk sont rarement compatibles. D'ailleurs, au Cnes, Robert Zubrin a eu quelques commentaires acides à l'encontre du patron de SpaceX dont le calendrier de conquête de Mars a été jugé trop optimiste et qu'il a même renvoyé à ses *« champignons »* : l'entrepreneur était alors accusé par une enquête du *Wall Street Journal* d'un usage immodéré des drogues. C'était il y a un peu plus d'un an. Désormais, ce sont les activités politiques d'Elon Musk et le poids qu'il fait peser sur la démocratie américaine et l'équilibre du monde qui inquiètent. Jadis meilleur avocat du voyage martien, Elon Musk paraît en être devenu le pire repoussoir. ■ **Olivier Lascar**

ÉTAT FONDAMENTAL D'UN SYSTÈME Correspond à son état stable de plus basse énergie possible.

CORRÉLATIONS QUANTIQUES Interactions entre particules dans un système quantique, empêchant leur description individuelle. Elles permettent des phénomènes comme l'intrication.

MOMENT ANGULAIRE Mesure la quantité de rotation d'un objet en mouvement autour d'un axe, dépendant de sa vitesse et de sa masse.

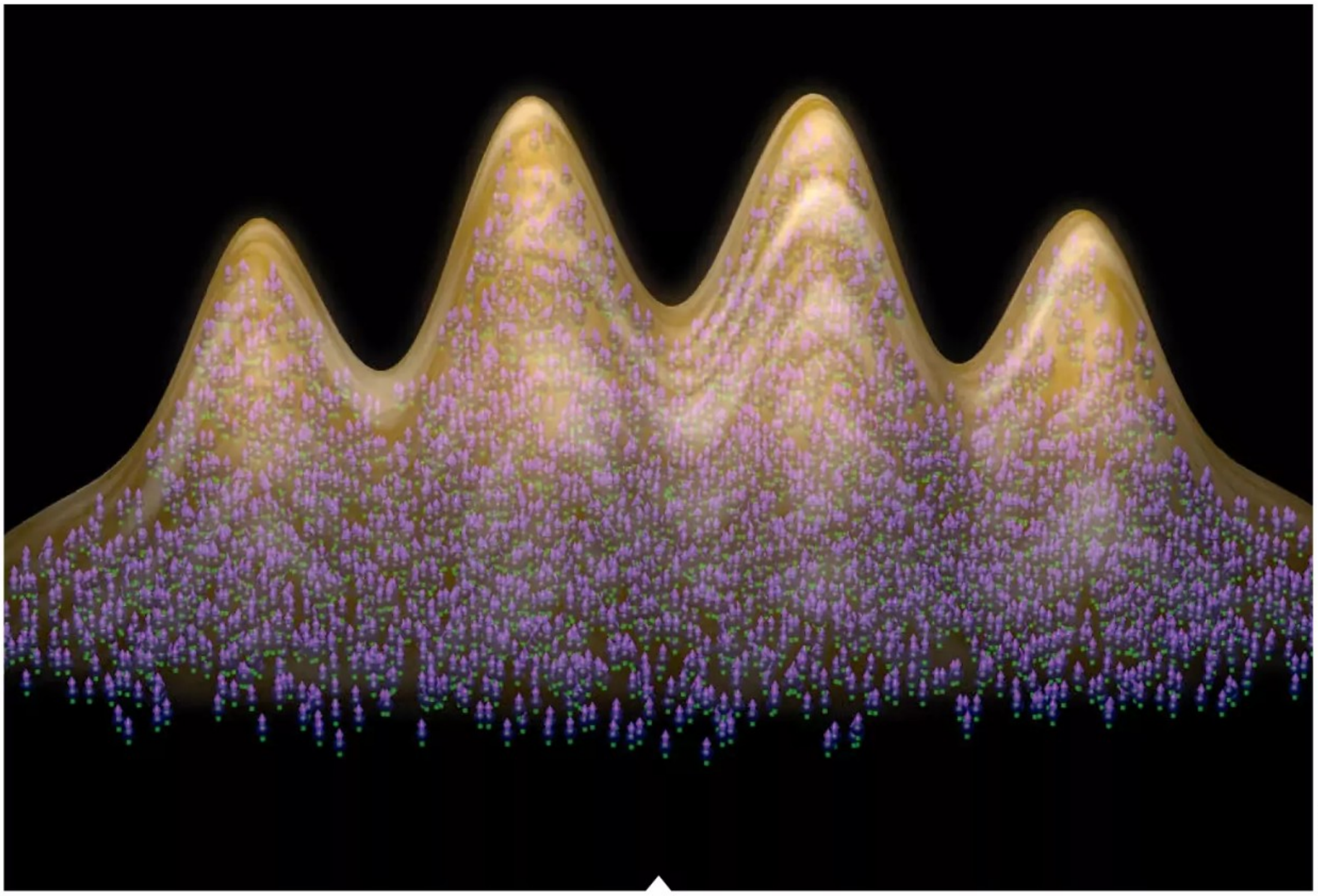
Le supersolide, un nouvel état entre cristal et superfluide

Une étude nouvelle apporte un éclairage inédit sur les étranges propriétés de ce matériau qui se comporte à la fois comme un solide et un liquide superfluide. Entre ordonnancement cristallin et écoulement sans friction, il pourrait expliquer des phénomènes se déroulant au cœur des étoiles à neutrons.

C'est une *terra incognita*, une « terre inconnue », comme celles qui parsemaient encore les cartes du XIXe siècle pour désigner l'Arctique, l'Antarctique ou le cœur de l'Afrique. Mais ici, point de reliefs ni de climats hostiles. Cette contrée inexplorée appartient au domaine de la physique quantique et porte le nom bien intrigant de « supersolide ». Un état de la matière exotique, où les atomes se comportent à la fois comme un solide et un liquide capable de s'écouler sans friction, un superfluide. Comme si un bloc de glace se laissait traverser par de l'eau liquide sans encombre. Et pour ajouter encore au mystère, ce matériau inédit se présente… sous la forme d'un gaz à deux dimensions seulement !

Théorisé dès les années 1950 *(lire l'encadré p. 35)*, il a fallu attendre 2019 pour qu'une preuve expérimentale soit apportée, tant cet état est délicat à obtenir et à caractériser. C'est donc grâce aux travaux de trois équipes indépendantes, celles de Francesca Ferlaino à l'université d'Innsbruck (Autriche), de Giovanni Modugno à Pise (Italie) et de Tilman Pfau à Stuttgart (Allemagne), que le supersolide émerge. Et ce n'est qu'en décembre 2024 qu'une publication dans *Nature*, signée par l'équipe d'Innsbruck, est venue donner une dernière confirmation de l'existence de cet état quantique aux confins du solide, du liquide et du gaz. Une *terra incognita* désormais un peu moins mystérieuse, donc…

Pour comprendre vraiment le supersolide, il faut élargir sérieusement nos idées sur ce qu'est un solide. Lauriane Chomaz est professeure à l'université de Heidelberg, en Allemagne. Elle dirige le groupe de recherche Quantum Fluids, qui explore les comportements collectifs de la matière quantique. Mais cinq ans plus tôt, elle participait à la mise au point du supersolide dans l'équipe de Francesca Ferlaino. Alors, à quoi ressemble-t-il concrètement ? *« Dans l'expérience de 2019, il se présente sous la forme d'un gaz d'atomes magnétiques* [de l'erbium ou du dysprosium] *organisé en une série de gouttelettes quantiques* [des amas d'atomes] *régulièrement espacées. C'est ce qui permet de parler de solide. »* En effet, dans un cristal par exemple, la



UNI INNSBRUCK

Ces crêtes et ces vallées, formées spontanément par des dizaines de milliers d'atomes magnétiques refroidis presque à -273,15 °C, constituent la structure cristalline d'un supersolide (représentation réalisée par les chercheurs de l'université d'Innsbruck, en Autriche).

matière est ordonnée, ce qui est l'une des caractéristiques du supersolide. Mais c'est bien la seule concession à l'état solide « classique » car, pour le reste, il s'en affranchit largement, comme nous allons le voir…

Condition indispensable pour élaborer ce supersolide : refroidir le gaz d'atomes aux environs de -273,15 °C, le « zéro absolu ». Il atteint alors un état où tous les atomes se comportent comme une seule entité — un condensat de Bose-Einstein. Ils ne bougent plus individuellement mais agissent ensemble. Grâce à cette propriété, ils forment un superfluide, qui s'écoule sans aucune résistance. Normalement, un liquide frotte contre les parois d'un récipient ou contre un obstacle, ce qui dissipe de l'énergie et finit par le ralentir. Dans un superfluide, si un seul atome devait être ralenti, cela briserait l'unicité de l'ensemble. Mais pas question « qu'une tête dépasse » avec les lois de la physique quantique. Donc il glisse indéfiniment, tant qu'il reste sous une certaine vitesse critique…

Confiner les atomes dans un piège optique

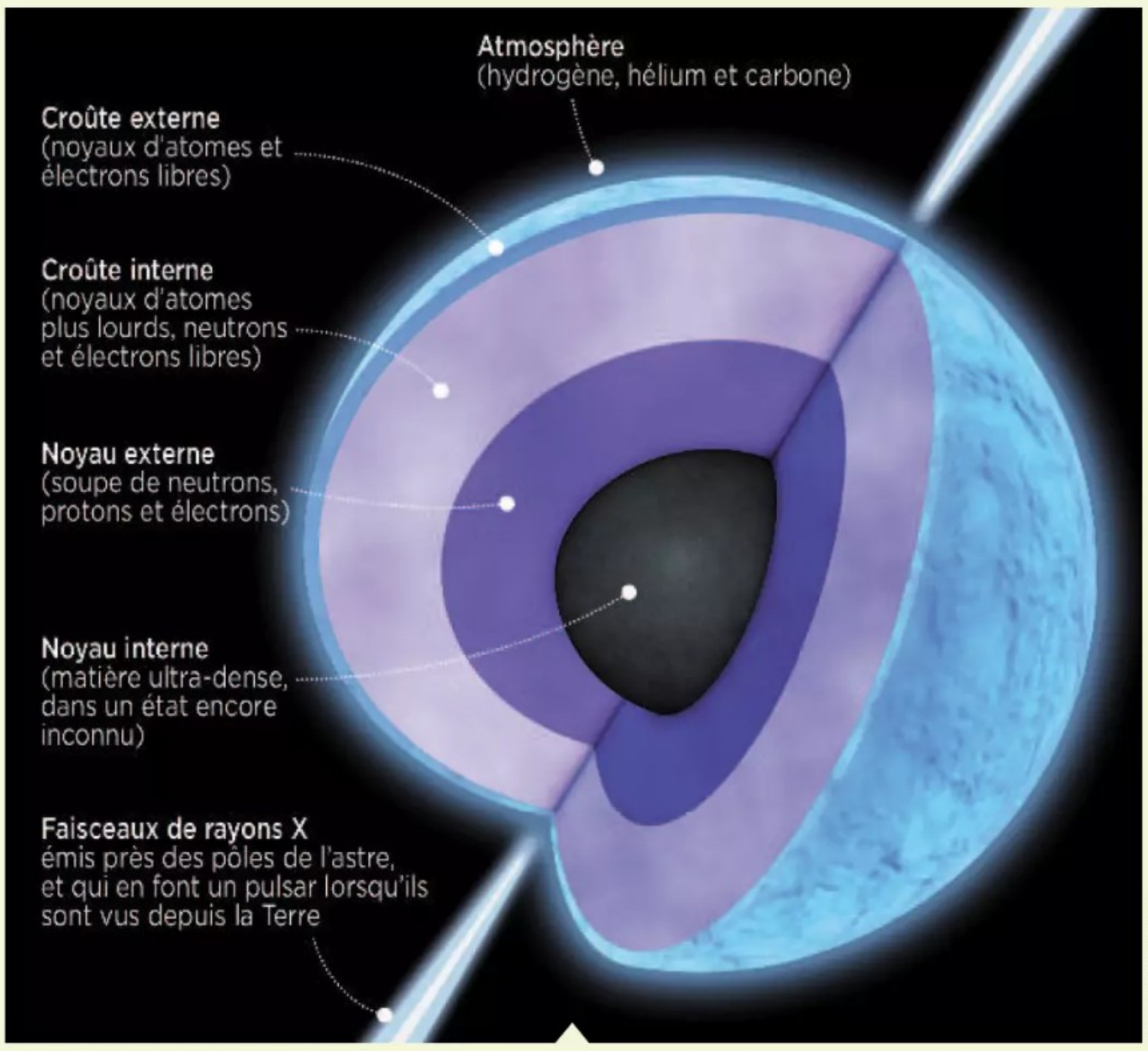
Obtenir un condensat de Bose-Einstein est une condition nécessaire, mais non suffisante, pour faire un supersolide. Il faut encore qu'il se structure de manière régulière. L'astuce repose sur la nature même des atomes utilisés : l'erbium et le dysprosium, deux métaux appartenant à la catégorie des terres rares. *« Ces éléments possèdent des moments magnétiques, ce qui signifie qu'ils se comportent comme de minuscules aimants »*, détaille Lauriane Chomaz.

En jouant sur ces interactions magnétiques — attraction et répulsion —, les scientifiques vont réussir à forcer ces atomes à s'organiser en gouttelettes périodiques. C'est ce qu'ont réalisé Francesca Ferlaino et son équipe à Innsbruck en 2019. Les atomes sont d'abord confinés à l'aide de lasers au sein d'un piège optique. *« Ce type de piège permet de confiner les atomes sans recourir à des champs magnétiques, ce qui est crucial pour manipuler ces atomes magnétiques et contrôler précisément leurs interactions »*, précise Lauriane Chomaz. Alors que la température est abaissée progressivement, les atomes ▸

OBJET EXTRÊME

Des supersolides dans la structure interne des étoiles à neutrons ?

Les étoiles à neutrons figurent parmi les objets les plus extrêmes de l'Univers : l'équivalent d'un Soleil compacté dans une sphère de seulement 12 km de rayon. Sous leur croûte solide, on soupçonne l'existence d'un bain de neutrons superfluides s'écoulant sans friction, formant un état de la matière qui combine structure cristalline et superfluidité. Un parallèle frappant avec les supersolides étudiés en laboratoire. Mais comment le démontrer ? Grâce à un comportement particulier de ces astres en rotation rapide sur eux-mêmes. Ils voient leur vitesse ralentir au fil du temps mais, parfois, leur fréquence de rotation connaît de brusques sursauts, appelés *glitches*, avant un retour à la normale. La cause de ces anomalies est mystérieuse.



La croûte interne d'une étoile à neutrons posséderait une structure rappelant celle des supersolides.

Une étude de 2024, menée par Francesca Ferlaino et Massimo Mannarelli (Laboratoire de Gran Sasso, en Italie), a exploré ce phénomène en utilisant un modèle inspiré des supersolides élaborés à l'université d'Innsbruck (Autriche). Les chercheurs ont fait l'hypothèse qu'au sein de la croûte interne des étoiles à neutrons, des vortex quantiques sont piégés dans la structure cristalline et empêchent le fluide superfluide de ralentir avec le reste de l'étoile. Peu à peu, un déséquilibre s'accumule entre la vitesse de rotation du superfluide et celle de la croûte. Lorsqu'un seuil critique est atteint, plusieurs vortex se libèrent brutalement, permettant au superfluide de céder une partie de son énergie à la croûte. Celle-ci accélère alors brièvement, provoquant le *glitch*. Or, un lien entre le comportement des vortex et la dynamique du supersolide a bien été observé expérimentalement, rapporte l'étude… Ce qui ouvre la voie à une simulation en laboratoire de ces astres aussi étranges qu'inatteignables.

forment un condensat de Bose-Einstein. Mais leur moment magnétique va modifier la donne par rapport à un condensat réalisé avec des atomes neutres, comme le raconte Francesca Ferlaino. *« Les atomes arrivant dans leur état fondamental décident de ne plus suivre l'organisation que le piège optique leur imposait. Ils choisissent spontanément une organisation qui minimise leur énergie d'interaction d'origine magnétique. Une fois l'équilibre atteint, les atomes s'organisent spontanément en une structure régulière, des gouttelettes de quelques milliers à plusieurs dizaines de milliers d'atomes chacune, ressemblant à un cristal.* » Avec de l'erbium, cette organisation est maintenue durant 38 millisecondes. Avec le dysprosium, 152 millisecondes. Depuis, la durée a été portée à une seconde. C'est largement suffisant pour considérer cet état comme stable. Il reste à démontrer qu'il se comporte aussi comme un superfluide.

Le vortex, signature incontestée de la superfluidité

En décembre 2024, l'équipe d'Innsbruck relève ce défi en mettant en évidence un phénomène clé : la formation de vortex quantiques. Comment ? En le faisant tourner rapidement sur lui-même, en mode toupie. Créer un vortex pour prouver la superfluidité peut sembler paradoxal. Lorsque l'on fait tourner un seau d'eau sur lui-même, les couches de fluide en contact direct avec la paroi sont mises en rotation par effet de frottement. Or, la superfluidité, c'est l'absence de forces de frottement. Alors pourquoi chercher à générer un vortex dans un supersolide ? Andrea Litvinov, post-doctorant dans l'équipe de Francesca Ferlaino, détaille ce point délicat. *« Lorsque nous mettons en rotation le supersolide, nous lui communiquons de l'énergie sous la forme d'un moment angulaire. Mais ce système n'a tout d'abord pas la capacité de l'absorber. Il faut atteindre une valeur bien précise d'énergie, un quantum, pour que tout à coup, l'énergie passe dans le système qui devient alors excité. Or, on sait depuis les années 1950 qu'un superfluide excité par une énergie de rotation génère spontanément des vortex. Leur apparition constitue ainsi une signature incontestable de la superfluidité.* » Dans l'expérience d'Innsbruck, les chercheurs ont appliqué un champ magnétique externe pour mettre en rotation le supersolide. Pendant les 300 premières millisecondes (ms), ils n'ont observé aucun changement notable. Autour de 400 ms, des vortex ont commencé à émerger. Vers 800 ms, le système a atteint un équilibre dynamique stable, où des tourbillons bien établis coexistent avec la structure solide. Pourquoi plusieurs tourbillons ? *« Contrairement à un liquide classique qui tourne en bloc, le supersolide résiste à une mise en rotation globale,* rappelle Francesca Ferlaino. *Pour s'adapter, il se fragmente en multiples tourbillons locaux. C'est sa façon de refuser une rotation imposée.* »

Prochaine étape : explorer ses propriétés

Maintenant que la physique a planté son drapeau sur cette *terra incognita*, quelle est la prochaine étape ? *« L'explorer !,* s'enthousiasme Andrea Litvinov. *Quelles sont ses propriétés ? Réagit-il de la même manière à plus grande échelle* [dans l'expérience d'Innsbruck, la taille du supersolide est de l'ordre de quelques micromètres] *? Comment le manipuler ? Nous avons encore tout à découvrir.* » Lauriane Chomaz, elle, y voit une occasion unique d'étudier les comportements collectifs de la matière. *« Le supersolide existe grâce aux corrélations quantiques des atomes. Cela soulève des questions fascinantes : comment ce comportement émerge-t-il ? Comment apparaissent les propriétés quantiques à partir de l'état classique ?* »

Francesca Ferlaino, enfin, pose une question vertigineuse : et si le supersolide existait ailleurs que dans les laboratoires ? *« Pour l'instant, nous ne l'avons obtenu que dans des conditions extrêmement contrôlées, mais il pourrait exister naturellement dans l'Univers* », avance-t-elle. Le plus extraordinaire, c'est que ce n'est pas exclu ! Certains astres exotiques, comme les étoiles à neutrons, pourraient bien receler de telles structures *(lire l'encadré ci-contre)*. D'autres *terrae incognitae* à explorer… ■ **Fabrice Nicot**

THÉORIE

Une histoire mal engagée

Tout avait bien mal commencé pour le supersolide… En 1956, les physiciens Oliver Penrose et Lars Onsager évoquent l'idée d'un état de matière à la fois solide et superfluide, mais concluent qu'il est impossible. Dès l'année suivante, Eugene Gross les contredit et propose un modèle suggérant qu'un tel état pourrait exister si les atomes interagissent à longue distance. Dans les années 1970, Anthony Leggett théorise la possibilité d'un supersolide dans l'hélium, mais les premières expériences en 2004, bien que prometteuses, sont controversées. Il faudra donc attendre la fin des années 2010 pour voir émerger le supersolide et caractériser ses propriétés étonnantes dans des gaz d'atomes ultrafroids.

M. VANDORY

« Cette structure que nous avons obtenue en laboratoire pourrait exister naturellement dans l'Univers »

Francesca Ferlaino, professeure de physique à l'université d'Innsbruck, en Autriche

ANTOINE MOREAU DUSAULT POUR SCIENCES ET AVENIR

De l'intelligence physique dans les robots

Les progrès de l'apprentissage automatique s'accompagnent de promesses d'autonomie pour les robots. Mais l'entraînement à partir de données comporte des limites. Des projets fondés sur l'apprentissage par expérience et par tâtonnement émergent.

Lorsqu'un média traite d'intelligence artificielle (IA), il y a de fortes chances qu'il illustre le sujet par un robot, humanoïde de préférence, avec le sous-entendu que la machine est en train de devenir un équivalent de l'humain. C'est encore loin d'être le cas. Les robots actuels restent très spécialisés, sur des chaînes industrielles ou dans des entrepôts comme chez Amazon. Et dans ces contextes, l'environnement a été adapté pour eux (sols plats, espace dégagé), et non l'inverse, avec des interactions humain-machine limitées pour des raisons de sécurité. Les progrès de l'apprentissage automatique ouvrent toutefois de réelles perspectives. La start-up californienne Physical Intelligence applique la méthode des modèles de langage (LLM) à son algorithme π_0 (pi-zero) destiné à gérer les mouvements de robots autonomes. Sauf qu'au lieu de collecter des masses de données d'Internet comme le font OpenAI, Google ou Meta, elle met en scène et filme quantité de situations où des robots téléopérés réalisent toutes sortes de tâches. La logique étant, comme pour les LLM,

24,73 secondes
Le temps mis par le robot bipède Cassie pour courir un 100 m en septembre 2022, un record pour une machine autonome de ce genre.

d'avoir une base d'apprentissage suffisamment riche pour que l'algorithme puisse extrapoler des gestes de manière à se déplacer en toute situation. *« Mais le robot n'est pas autonome dès lors qu'il s'agit de faire émerger des concepts pour la manipulation ou la locomotion, puisqu'il réplique ce que l'humain lui a montré,* tempère Justin Carpentier, responsable de l'équipe Willow à l'Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique (Inria). *Le robot imite correctement mais, pour nous, ce n'est pas de l'intelligence physique.* » Sans compter que, comme pour les LLM, cette approche est vulnérable aux hallucinations. On imagine sans peine les dangers d'un robot qui « génère » des mouvements aberrants…

Les machines ont d'abord beaucoup expérimenté

C'est pourquoi nombre d'autres projets reposent non plus sur les données mais sur l'essai-erreur, à savoir l'apprentissage par renforcement. Le robot bipède Cassie, d'Agility Robotics (issue de l'université d'État de l'Oregon, aux États-Unis), a appris de cette manière à marcher, à courir ou à emprunter des escaliers. À l'automne 2023, des chercheurs en robotique américains et chinois dévoilaient un robot quadrupède enchaînant les épreuves du parkour (une discipline athlétique inspirée du parcours du combattant) et l'an dernier, DeepMind (division IA de Google) présentait des mini-robots footballeurs. Dans tous ces projets, les machines ont beaucoup expérimenté et se sont beaucoup trompées, avant de trouver d'elles-mêmes les mouvements les plus efficaces pour un contexte donné.

La méthode a pour grand intérêt d'ouvrir la voie à des comportements contre-intuitifs, qu'un codeur humain n'aurait pas imaginé et qui n'existent dans aucun exemple en image. Elle implique néanmoins d'innombrables itérations, un algorithme étant incapable d'apprendre, comme un humain, après un ou deux essais. D'où un entraînement se déroulant d'abord en simulation. *« Il faut plusieurs "équivalents-années" pour obtenir quelque chose de pertinent,* note Justin Carpentier. *Nous sommes en train de travailler sur ce que l'on appelle les dérivés de la simulation, des objets mathématiques qui permettraient d'accélérer cet apprentissage, mais c'est compliqué.* »

L'équipe Willow a obtenu en septembre 2024 un financement européen (ERC), à hauteur de 1,5 million d'euros sur cinq ans, pour le projet Artefact, reposant sur l'apprentissage autosupervisé : l'algorithme est entraîné sur des données non annotées puis est appliqué à un jumeau numérique du robot, en environnement simulé. *« La simulation doit être suffisamment fidèle à la réalité physique pour que nous puissions tester, tâtonner et corriger l'algorithme lorsqu'il se trouve dans une situation absente de sa base d'apprentissage »*, explique Justin Carpentier. C'est ce que l'on appelle la commande prédictive (par opposition à la commande instantanée des robots d'usine), qui consiste à anticiper la chute d'un robot pour rectifier à temps sa trajectoire. Des travaux qui, à terme, rendront les machines adaptables à plus de situations que celles qui existent actuellement. Elles seront sans doute moins rapides mais plus polyvalentes. ■ **Arnaud Devillard**

LE MOT DU MOIS

Apprentissage par renforcement

Cette méthode s'applique surtout à l'apprentissage d'un comportement, non à la production d'une prédiction. D'où son usage en robotique ou dans la programmation d'agents capables de jouer à un jeu. Elle a même servi à la tenue de route de véhicules autonomes. Un algorithme d'apprentissage par renforcement ne s'appuie sur aucune instruction ou exemple préalable mais sur l'expérience, par tâtonnement. Il déclenche au départ des actions aléatoires, mais celles qui s'avèrent efficaces pour le but recherché (avancer, tenir en équilibre) s'accompagnent d'un signal dit de récompense. En fonction de quoi, les comportements s'améliorent au fur et à mesure. Mais un tel algorithme obéit à un compromis : il ne doit pas se contenter de refaire les mêmes actions récompensées ; il doit en trouver d'autres en explorant de nouveaux comportements, quitte à échouer de temps en temps.

POUR EN SAVOIR PLUS

OP3 Soccer, le projet de mini-robots footballeurs : **sciav.fr/937soccer**

JUSTIN CARPENTIER

« Nous travaillons sur ce que l'on appelle les dérivés de la simulation, des objets mathématiques qui permettraient d'accélérer l'apprentissage »
Justin Carpentier, responsable de l'équipe Willow à l'Inria

Une tente montée en lisière de village fait office de laboratoire de brousse (en haut). Elle permet d'éviter la contamination des échantillons prélevés sur les rongeurs capturés. Les cicatrices palmaires et plantaires sont fréquentes chez les personnes guéries (en bas).

Mpox

À la recherche de l'animal réservoir

En République démocratique du Congo, où la variole du singe est endémique, une mission franco-congolaise tente d'identifier sur le terrain l'animal, probablement un rongeur, jouant le rôle de « réservoir » du virus. Elle suit également l'évolution de la maladie dans les zones les plus reculées. Reportage au cœur de la forêt.

Texte et photos : Jean-François Lagrot

C'est une équipe aguerrie qui sillonne la forêt marécageuse située au nord-ouest de la République démocratique du Congo (RDC). Depuis de nombreuses années, les chercheurs de l'Institut national de recherche biomédicale (INRB) de Kinshasa et de l'Institut de recherche et de développement (IRD) de Montpellier tentent conjointement de percer les mystères des zoonoses. Après le VIH, le virus Ebola et les coronavirus, ils étudient aujourd'hui le virus Mpox, responsable d'une maladie apparentée à la variole, qui après avoir été pour la première fois décrite en 1970 en RDC, s'est répandue dans le pays jusqu'à sévir de nos jours de façon endémique. En 2022, poursuivant son expansion au-delà des océans, le virus a causé une épidémie dans plus d'une centaine de pays.

L'enjeu de la mission actuelle est de comprendre l'évolution de Mpox. Il s'agit aussi de mieux connaître la réponse immunitaire ainsi que la cinétique et la persistance des anticorps une fois la guérison obtenue. Car de nombreuses questions demeurent. On ne sait pas si le virus reste présent après la guérison, comme c'est le cas pour Ebola. On ne sait pas non plus si des proches peuvent ▸

être contaminés sans développer de symptômes. Si la maladie et le virus demeurent méconnus, c'est notamment parce que la majorité des infections a lieu dans ces zones difficiles d'accès. *« En 2024, nous avons recensé 221 cas avec 14 décès, 204 guéris et quelques "évadés" en cours de traitement… C'est bien plus qu'en 2022 et 2023.* » Dans son bureau au bout d'une coursive humide et décrépie, le médecin-chef de l'hôpital de N'Tondo dresse un état de lieux à l'attention du Dr Meris Matondo de l'INRB, le chef de la mission. Dans ce village situé sur les rives du lac Tumba, sorte de vessie du fleuve Congo, situé quelque 700 kilomètres en amont de Kinshasa, les cas de Mpox sont toujours plus nombreux.

La moto, seul moyen d'atteindre les villages touchés

Au total, ce sont plus de 50 000 cas qui ont été recensés en 2024 en RDC, pays grand comme quatre fois la France. Mais en cette fin de saison des pluies, le petit hôpital de N'Tondo ne compte aucun patient atteint de la maladie. *« Tous partent dès qu'ils apprennent qu'ils seront traités et nourris gratuitement à l'hôpital de Bikoro ! Allez plutôt jusqu'au village suivant. Il y a eu de nombreux cas, là-bas.* » Le médecin raconte que les derniers malades à être parvenus jusqu'à lui, une famille comprenant quatre enfants, avaient parcouru à pied plus de 100 km. Peu après être arrivés à l'hôpital, deux des enfants avaient succombé. Tous avaient consommé la viande d'un singe trouvé mort dans la forêt…

Les trois motos prennent le chemin du village indiqué. L'équipe est à la recherche de personnes malades, de leur entourage et de personnes guéries afin d'effectuer examens et prélèvements. La moto est aujourd'hui le seul moyen d'atteindre les villages touchés… La piste est étroite. La saison des pluies a creusé de profondes saignées dans la latérite rouge. Les cartons dans lesquels sont rangés les écouvillons et les tubes nécessaires aux prélèvements, bien que solidement arrimés aux porte-bagages, brinquebalent dans tous les sens. L'équipe franco-congolaise composée de huit personnes s'est scindée en deux parties. Tandis que l'une part à moto à la rencontre de patients, l'équipe vétérinaire, supervisée par l'écologue Simon-Pierre Ndimbo-Kumugo de l'INRB, s'affaire à poser des pièges dans un autre village, dans le but de découvrir le réservoir animal du virus.

Perdu dans la moiteur d'une forêt opaque, le village suivant est coupé en deux par la piste. L'infirmier titulaire du poste de santé a réuni les villageois malades et guéris pour leur proposer examens cliniques et prélèvements. Ce n'est pas toujours simple. Le tableau clinique de la maladie est impressionnant. Des papules apparaissent au point d'entrée du virus, sur les mains par exemple. Peu à peu, le visage, le torse et les membres se couvrent de pustules qui peuvent s'infec-

FICHE D'IDENTITÉ

Un virus à ADN qui comporte deux clades

Le Mpox, comme le virus de la variole humaine dont il est très proche, appartient à la famille des *Poxviridae*. C'est un virus à ADN dix fois plus gros que le virus Ebola, dont la forme s'apparente à celle d'une brique. Il en existe deux clades : le clade 2 sévit en Afrique de l'Ouest, le clade 1 en Afrique centrale, principalement en RDC. La rivière Sanaga (Cameroun) est une ligne de partage entre les deux clades. On ignore la raison de cette partition. Elle est probablement due à l'espèce « réservoir » différente de part et d'autre du fleuve… Le clade 1 se divise en clade 1a, avec une variabilité génétique forte car les différentes souches évoluent depuis des siècles dans les réservoirs animaux. Le clade 1b, apparu récemment dans l'est de la RDC, a une variabilité génétique faible, preuve d'une évolution récente chez l'humain.

L'anthropologue de la mission recueille les circonstances dans lesquelles les personnes se sont infectées, pour reconstituer la chaîne de transmission (ci-contre). **Le dermatologue** photographie les signes cliniques et les cicatrices afin de suivre leur évolution (en haut, à gauche). **Les échantillons** conditionnés sont conservés à température négative. Assurer la chaîne du froid jusqu'au retour à Kinshasa est un défi permanent (en bas, à gauche).

ter. Et dans une société prompte à invoquer les actes de sorcellerie, les malades sont facilement discriminés. Cependant les gens viennent nombreux.

Au sein du petit groupe attroupé sous la paillote au toit tressé de palmes, un père d'une trentaine d'années s'avance. Il pousse devant lui un jeune garçon qui semble être son fils et dont le regard est oblitéré par une tache blanchâtre sur la cornée, une séquelle courante chez les anciens malades de Mpox dont la vision est alors altérée. L'anthropologue de la mission, Almudena Mari Saez, de l'IRD, le questionne sur sa maladie. L'infirmier doit traduire les questions. L'enfant s'est contaminé au contact de son cousin, qui part souvent chasser dans la forêt alentour. L'anthropologue note les moindres détails sur sa filiation, les habitudes familiales, son régime alimentaire, la pratique de la chasse et les espèces concernées. Il s'agit de consigner les éléments qui, une fois confrontés les uns aux autres, permettront d'appuyer ou de réfuter une thèse sur le présumé réservoir animal, le mode de contamination et la propagation de la maladie. L'anthropologue mène l'enquête. Quelques indices recueillis depuis le début de la mission semblent déjà converger : la contamination zoonotique continue d'être prépondérante… Et les chasseurs ne sont pas forcément les maillons clés de la chaîne de transmission. En effet, la plupart des malades sont des enfants. Les cas apparaissent dans des villages éloignés les uns des autres, sans aucun lien, ce qui laisse penser que les villageois se contaminent à partir d'un animal infecté, ou à partir de l'espèce réservoir, qui serait probablement un rongeur.

Les cas apparaissent dans des villages éloignés les uns des autres, sans aucun lien, ce qui laisse penser que les villageois se contaminent à partir d'un animal infecté, ou à partir de l'espèce réservoir

Deux épidémies d'une frontière à l'autre de la RDC

Il existe ensuite une contagion interhumaine dans un cercle souvent restreint à la famille ou au voisinage, ce qui tend à prouver que les souches locales du clade 1a du virus ne sont pas encore très adaptées à l'hôte humain. Ces caractéristiques marquent une différence notoire avec ce qui se passe dans l'est du pays, où sévit depuis l'été 2023 le clade 1b du virus. Dans cette région minière, la densité humaine importante a offert au virus un environnement beaucoup plus favorable à sa propagation et à son adaptation à l'humain. La variabilité génétique observée chez le virus du clade 1b atteste d'une adaptation facilitée par une population plus dense que dans les zones forestières rurales. Désormais, dans cette région, la contamination n'est plus zoonotique mais essentiellement interhumaine et se fait le plus souvent par contact sexuel, comme le met en lumière une publication dans la

IRD-JFLAGROT

ENTRETIEN

MARTINE PEETERS VIROLOGUE, DIRECTRICE DE RECHERCHE À L'IRD DE MONTPELLIER

« On peut circonscrire l'expansion de la maladie »

Vous avez étudié l'histoire du VIH et maintenant du Mpox. Voyez-vous des similitudes entre les deux ?
L'épidémie Mpox suit une évolution comparable à celle du VIH. Les deux virus proviennent des forêts d'Afrique centrale. Tous deux ont une origine animale : les grands singes pour le VIH, probablement un rongeur pour le virus Mpox. Pour les deux virus, l'adaptation à l'humain se fait progressivement dès lors que les conditions deviennent favorables, c'est-à-dire lorsque les contacts deviennent plus fréquents. Ils se transmettent ensuite plus facilement d'un individu à l'autre, puis d'un continent à l'autre, au gré des déplacements. Une épidémie à grande échelle devient alors possible. Ce fut le cas pour le VIH au xx^{e} siècle, puis pour le Mpox en 2022. Il existe heureusement une différence notable entre les deux virus : Mpox provoque rapidement des symptômes visibles et on peut circonscrire l'expansion de la maladie. Pour le VIH, plusieurs années passent avant que les symptômes n'apparaissent. Le virus a ainsi pu se transmettre à des milliers de personnes dans le monde.

Entre janvier 2024 et janvier 2025, 225 cas de Mpox ont été recensés en France. Selon vous, comment va évoluer la maladie en France et plus largement en Europe ?
Jusqu'ici, la contamination se faisait essentiellement par contact sexuel au sein de la communauté homosexuelle masculine. Le clade 2b du virus était responsable des cas détectés en Europe. Or en janvier, une personne a été contaminée en Bretagne par le clade 1b pour la première fois, après contact avec des personnes de retour d'Afrique centrale. Heureusement, la maladie a été aussitôt circonscrite. La surveillance reste donc primordiale. Il existe par ailleurs un vaccin. Quant aux générations nées avant 1979, date de l'arrêt de la vaccination obligatoire contre la variole, elles ont une immunité croisée qui les protège à plus de 80 % contre le Mpox. ■

Propos recueillis par J.-F. L.

revue *Cell* datée de janvier. Il semble que l'on assiste donc à la différenciation de deux épidémies Mpox d'une frontière à l'autre de la RDC, avec un tableau clinique assez proche mais un mode de contamination qui les différencie.
Dans le centre de santé du village, tandis que l'anthropologue poursuit ses entretiens, l'équipe médicale procède à des examens cliniques et à des prélèvements chez les volontaires. Ce sont en majorité des mères ou des pères qui accompagnent leur enfant. Prises de sang, grattage des anciennes pustules, prélèvements buccaux… Ils permettront bientôt de savoir si le virus reste ou non présent chez les personnes guéries. Des prélèvements antérieurs ont déjà montré que l'on pouvait mettre en évidence des protéines virales dans le liquide lacrymal après guérison. De son côté, le dermatologue prend des clichés des lésions et des cicatrices afin de documenter et décrire leur évolution dans le temps… Les visages apparaissent comme grêlés, les cicatrices fréquentes sur les faces palmaires et plantaires des extrémités. Les patients défilent.

Une vingtaine de pièges disposés dans différents biotopes

Le rythme des événements s'accélère ensuite. Il est en effet imposé par la nécessité de conserver les échantillons à température négative dans les heures qui suivent. L'équipe enfourche les motos pour rejoindre rapidement Bikoro. Là, deux laborantines prendront le relais pour conditionner les échantillons du jour dans le laboratoire local où la chaîne du froid est assurée. Mais c'est sans compter avec la chute d'un immense arbre sur la piste. Il faut alors découper à la machette, écarter les épais branchages et les lianes, se faufiler sous le tronc au prix d'acrobaties sur la moto tout en prenant soin des échantillons…

Le réservoir de la maladie est sans doute un rongeur. Des pièges sont posés régulièrement dans les zones où sévit le Mpox (en bas, à droite). Actuellement, les soupçons portent sur l'écureuil du genre « Funisciurus » sur lequel des prélèvements sont effectués par les chercheurs (à gauche).
En zone forestière, les villages sont difficiles d'accès, notamment en saison des pluies, ce qui rend particulièrement difficile le suivi de l'épidémie (en haut, à droite).

Pour l'équipe dédiée à la recherche du réservoir animal, la journée est fructueuse. La veille, une première visite dans un village situé à proximité de Bikoro a permis de disposer une vingtaine de pièges dans différents biotopes. Les pièges à rongeurs ont été disposés à l'intérieur des cases, dans les champs de manioc et dans la forêt environnante. Résultat : un rat, une musaraigne éléphant et deux écureuils ont été capturés. Le laboratoire de brousse, une grande tente, a été installé sous l'œil médusé d'une foule agitée de gamins, de paysans et de villageois heureux de voir débarquer cette mission « spatiale » avec ses blouses plastifiées, ses charlottes et ses masques. Sous la chaleur étouffante, les chercheurs effectuent des prélèvements sur les rongeurs. Sont-ils porteurs du virus ? Les soupçons se portent depuis quelque temps sur des écureuils (*Funisciurus*), après que le rat de Gambie (*Cricetomys*) a aussi été pressenti. Mais pour l'heure, il n'y a aucune certitude.

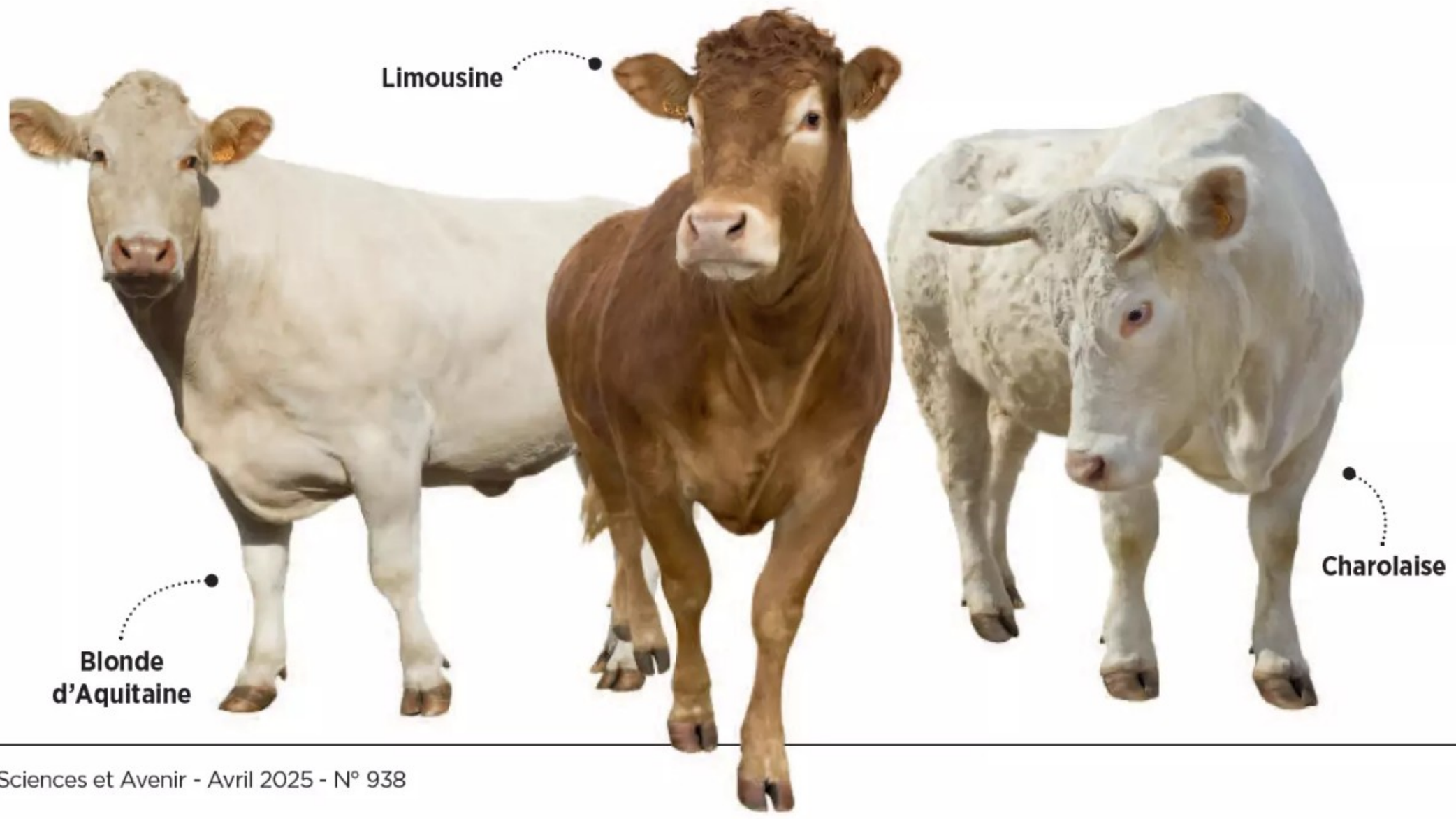
Après une journée harassante, les deux équipes se retrouvent le soir venu. La veille, l'équipe médicale, surprise par la nuit, a dû bivouaquer dans un village, dormant à même le sol dans une case de passage… Aujourd'hui c'est Jolie Kamala, une des laborantines, qui s'affaire autour du feu. Au menu : haricots rouges, sardines et « pondu », un accompagnement fait de feuilles de manioc pilées puis cuites façon épinards. Auparavant, les deux laborantines ont conditionné des heures durant les échantillons, une priorité absolue avant le retour à Kinshasa. Lors de ces missions de terrain, assurer la chaîne du froid est un défi permanent, entre panne de courant et recherche de carburant pour alimenter un groupe électrogène… Demain, l'équipe atteindra Mbandaka après six heures passées sur une piste défoncée. Dans la capitale de la province de l'Équateur, l'équipe visitera les trois centres de traitement Mpox. Puis ce sera le retour à Kinshasa où, dans les locaux de l'INRB, les laboratoires de virologie et de génomique, dirigés par les Pr Steve Ahuka Mundeke et Placide Mbala, de renommée internationale, permettront un diagnostic et un séquençage rapide. Suivre l'évolution du virus à la trace, à défaut de pouvoir le devancer, et identifier les animaux qui en sont le réservoir demeurent une nécessité absolue pour mieux prévenir une nouvelle pandémie. ■

Les bovins menacés par un appauvrissement génétique

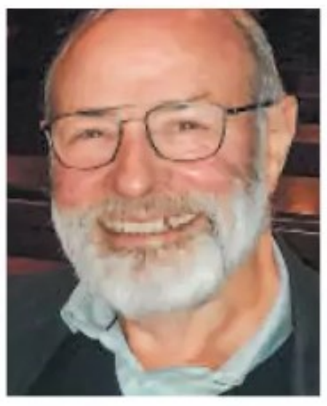
Depuis 10 000 ans, vaches et taureaux ont été façonnés afin de répondre aux besoins des humains en viande et en lait. Jusqu'à imposer dans les années 1960 l'insémination artificielle pour diffuser la semence des meilleurs reproducteurs. Un modèle industriel à bout de souffle qui favorise le développement de maladies génétiques.

La vache, quelle histoire ! Les visiteurs ayant frôlé leurs croupes au Salon international de l'agriculture (SIA) en février dernier, à Paris, ont admiré les derniers avatars d'une espèce millénaire que l'humain a arrachée à la nature. Placides, ces animaux domestiques sont les descendants directs des aurochs dont ils ont perdu la sauvagerie et la richesse génétique. Sélectionnés pour leur docilité, puis pour leur productivité en viande et en lait, les bovins actuels *Bos taurus* ont été façonnés pour répondre aux besoins des humains. Au point de réduire à l'extrême le nombre de taureaux reproducteurs afin de diffuser les gènes les plus intéressants pour l'élevage intensif. Une trajectoire étonnante : il y a 11 000 ans seulement, l'espèce était la plus diverse qui soit. C'est ce que vient de démontrer définitivement dans *Nature,* en octobre 2024, une équipe internationale menée par le Trinity College de Dublin (Irlande).

Pour la première fois, les génomes de 38 ossements de l'aurochs ancestral *Bos primigenius,* retrouvés dans des



sites archéologiques européens et asiatiques vieux de 47 000 à 4000 ans, ont été séquencés. Ce travail confirme les différentes sous-populations de l'espèce apparue il y a 2 millions d'années en Asie. « *Ce grand herbivore de plus de 2 mètres de haut au garrot est arrivé en Europe il y a environ 650 000 ans, si bien que l'espèce était alors présente dans toute l'Eurasie* », raconte Aurélie Manin, archéozoologue et coauteure de l'article de *Nature*.


JEAN-DENIS VIGNE

« Seules 80 femelles d'aurochs environ ont donné naissance à toute la diversité génétique des bovins taurins actuels »

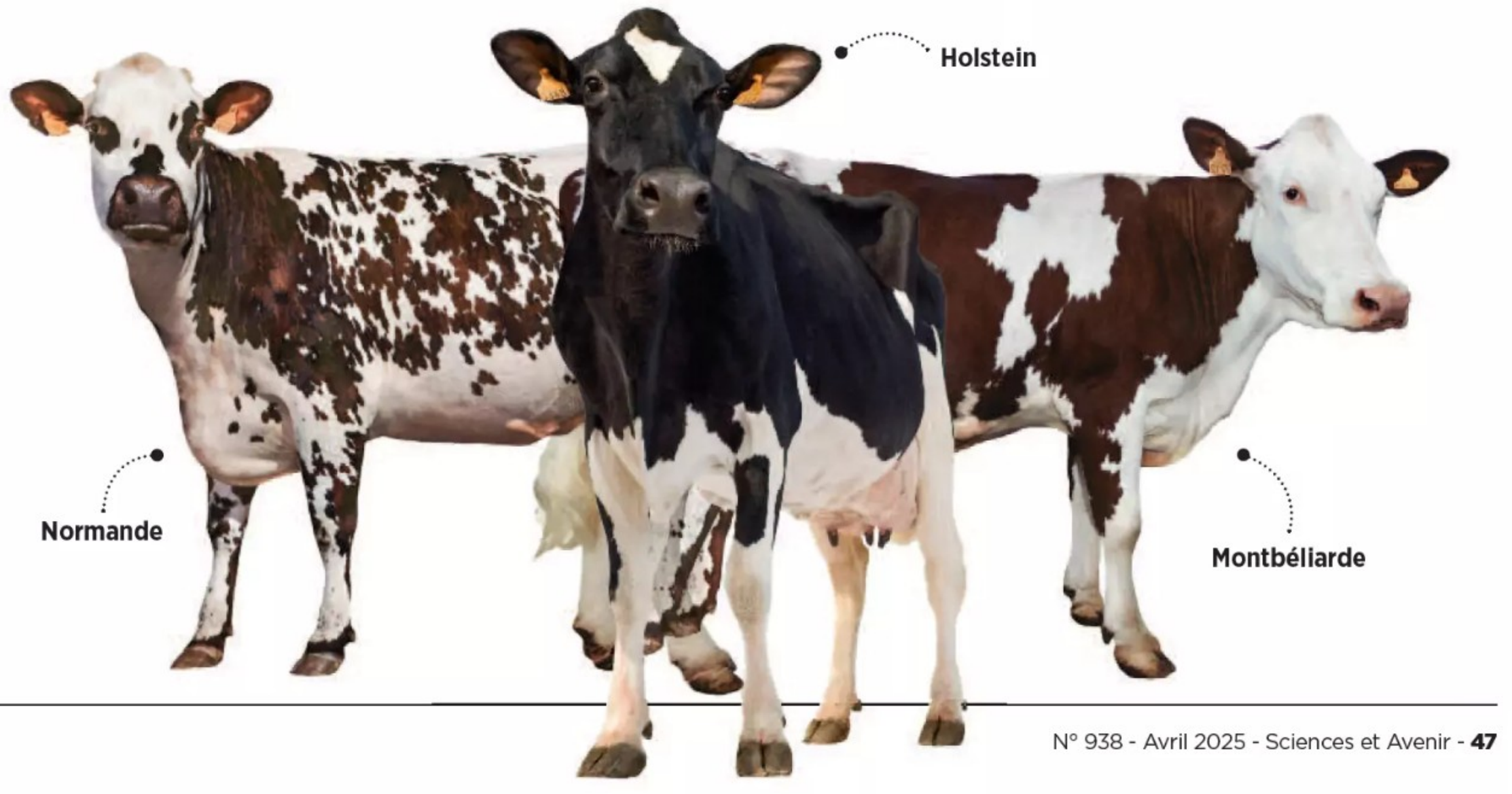
Jean-Denis Vigne, chercheur au CNRS et au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris

Les aurochs étaient divisés en trois sous-populations

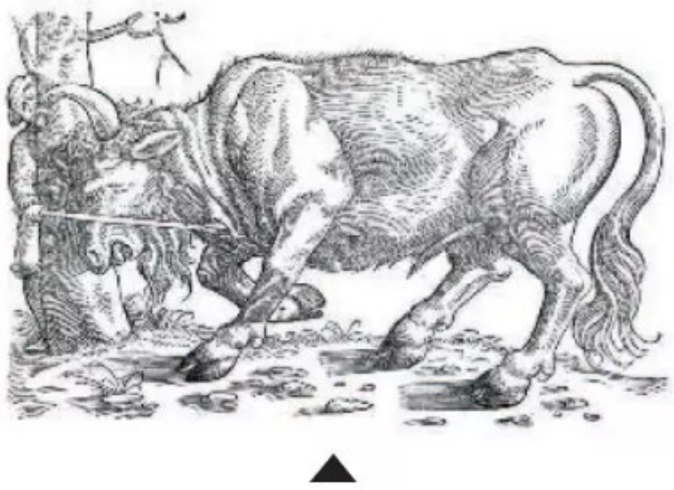
Quand l'holocène, notre ère géologique actuelle, débute, il y a 11 700 ans, les aurochs sont divisés en trois sous-populations, l'une occidentale dite taurine, ancêtre de nos vaches, la seconde à bosse, qui donnera dans toute l'Asie les zébus, et une souche africaine dont on sait peu de choses du fait que les races propres à ce continent ont été décimées par une peste bovine au XIXe siècle et remplacées par du bétail d'importation. « *Ainsi, avant la domestication, l'aurochs était une espèce avec une riche diversité génétique* », souligne Aurélie Manin. Ces millions d'individus vivant en troupeaux ont façonné le paysage pour notre plus grand profit. Par leur herbivorie, les aurochs ont en effet freiné la colonisation des forêts et pérennisé les prairies. Ce qu'il s'est passé lors de la rencontre avec les humains n'est vraiment connu que depuis quelques décennies, et ce grâce aux progrès génétiques qui ont permis de séquencer l'ADN des os retrouvés dans les sites archéologiques et dans la nature. « *Nous avons pu ainsi retracer l'origine des premiers aurochs domestiqués* », se réjouit Jean-Denis Vigne, chercheur au CNRS et au Muséum national d'histoire naturelle, à Paris. Pour cela, les archéologues ont un indice : la domestication entraîne une réduction de la taille des individus du fait de la sélection des plus dociles et accessibles. L'exhumation dans les sites archéologiques d'os de bovins plus petits que ceux des aurochs implique la présence d'animaux domestiqués. « *Cette technique appliquée aux ossements du site de Mureybet, situé dans la vallée moyenne de l'Euphrate* [Syrie actuelle], *a montré que la taille des mâles avait sensiblement diminué il y a environ 10 500 ans, alors que celle des femelles était restée stable,* expose Jean-Denis Vigne. *De ce fait, la différence entre les deux sexes s'est réduite, phénomène dénotant des modifications hormonales liées à la vie en captivité ou un début de sélection par les humains des taureaux les moins agressifs* ». Les taurins ont ainsi été domestiqués 2000 ans avant le zébu. Cette région des confins de l'Anatolie est l'unique théâtre de la sujétion des

CLAUDIUS THIRIET / BIOSPHOTO - CLAUDIUS THIRIET / ANDIA.FR

La France compte plusieurs dizaines de races, sélectionnées pour la production laitière (à droite) ou de viande (à gauche). Elles sont les descendantes directes des aurochs, dont le dernier spécimen a disparu en 1627.



aurochs aux humains. Contrairement aux chèvres et aux moutons, la domestication des bovins s'est déroulée dans une région assez restreinte et sur un très petit nombre d'individus. *« L'ADN ancien de 18 bovins iraniens du néolithique à l'âge du fer, comparé à de très nombreuses séquences génétiques de vaches modernes, a démontré que seules 80 femelles d'aurochs environ ont donné naissance à toute la diversité génétique des bovins taurins actuels ! »*, s'étonne encore Jean-Denis Vigne. Il est probable que la taille imposante de l'animal ait dissuadé nombre d'humains de s'en approcher. On ne peut qu'imaginer la rencontre puis l'adaptation entre des humains un peu plus téméraires face à des aurochs attirés par les chaumes des premiers champs cultivés. On ne sait rien des motivations de ces premiers éleveurs : prestige ou signe de richesse ?



GRANGER / BRIDGEMAN IMAGES

Dessin d'un aurochs tiré de l'ouvrage de zoologie « Historia Animalium » de Conrad Gessner, paru en 1551.

consommation du lait, attestée d'ailleurs à la même époque pour les chèvres et brebis ? utilisation de la force de portage ? Ce qui est certain, c'est que l'espèce connaît un drastique « goulet d'étranglement » de sa richesse génétique, passant d'une profusion de femelles sauvages à 80 domestiquées.

La diffusion des premières vaches est en tout cas rapide. L'équipe de Jean-Denis Vigne est à l'origine d'une découverte étonnante. De nombreux ossements appartenant à des animaux domestiqués ont été exhumés dans l'île de Chypre. Leur datation a montré que ces bovins étaient arrivés moins de mille ans après la première domestication. Ce qui implique qu'autour de -8000 ans, la complicité entre l'animal et l'humain était suffisante pour réussir un voyage en mer de 80 km.

Les vaches proviennent bien d'un seul lieu d'Anatolie

En 2001, une analyse des mêmes chercheurs irlandais ayant publié l'automne dernier dans *Nature* avait déjà confirmé que les spécimens vus au Salon de l'agriculture n'avaient aucun lien avec les aurochs vivant sur ces mêmes pâturages de l'ouest du continent, preuve que les vaches proviennent bien toutes d'un seul lieu d'Anatolie. Pourquoi les humains qui ont peint et gravé l'animal sur les parois des grottes du sud actuel de la France n'ont-ils pas domestiqué « leurs » aurochs ? *« L'hypothèse la plus vraisemblable réside dans le statut des grands bovins sauvages, dont la valeur symbolique était très forte, comme l'attestent les offrandes de bucranes* [des ornements gravés] *dans les tombes du mésolithique ou les représentations d'immenses cornes dans les monuments mégalithiques d'Occident,* suppose Jean-Denis Vigne. *Leur chasse jouait sans doute un rôle social ou initiatique inspiré par la sauvagerie et la dangerosité de l'animal, autant de caractéristiques que la domestication aurait abolies. »*

Les relations entre les femelles domestiquées et les mâles sauvages n'ont cependant pas immédiatement cessé. Tout au long de la progression des troupeaux de l'est vers l'ouest du bassin méditerranéen, des aurochs ont « couvert » des vaches. La pratique a même été visiblement encouragée au néolithique dans l'actuelle Grande-Bretagne, vraisemblablement pour régénérer l'espèce. Au cours de ces milliers d'années, l'essor du

RECENSEMENT

Des risques de consanguinité sous-évalués

Dans les années 1970-2000, un petit nombre de super-reproducteurs tels Elevation, Chief, O-Man… ont eu des centaines de milliers de descendants, influençant fortement le patrimoine génétique de la race holstein. Si les gènes de ces taureaux garantissent aujourd'hui les capacités de production exceptionnelles de cette laitière de premier plan, les risques de consanguinité au sein du cheptel ont fortement augmenté. En France, les éleveurs sont invités à communiquer à l'Observatoire national des anomalies bovines (www.onab.fr) les signalements de veaux nés avec des malformations ou des tares. *« Malheureusement, nous n'enregistrons que 500 signalements par an pour 6 millions de naissances toutes races confondues, ce qui suggère que la plupart des cas ne sont pas recensés »*, déplore Aurélien Capitan, généticien à l'Institut national de la recherche agronomique (Inrae). Les désordres immunitaires ou métaboliques d'origine génétique sont souvent confondus avec des maladies banales qui affectent les veaux ; aussi une nouvelle méthode permet aujourd'hui de repérer des régions du génome liées à une surmortalité juvénile ou à une réduction de la vie productive des vaches. *« L'une des découvertes majeures, c'est la détection du syndrome Blird qui, chez les holstein, provoque un déficit de l'immunité intestinale et des retards de croissance »*, se félicite le chercheur. La méthode devrait aussi permettre de repérer des mutations chez les taureaux reproducteurs.

CLAUDIUS THIRIET / NATURAGENCY

La sélection des reproducteurs et l'insémination artificielle ont accéléré la perte de la diversité génétique (ici prélèvement de sperme).

nombre de vaches domestiquées a cependant coïncidé avec le déclin des aurochs. La chasse, la réduction des herbages laissés libres par les humains, les maladies transmises par les bovins domestiques, toutes ces causes entremêlées expliquent la disparition de l'aurochs. Le dernier spécimen attesté est mort au zoo de Varsovie en 1627.

Les bovins, eux, se sont donc multipliés. Dans l'agriculture de l'Antiquité au XIXe siècle, ils servent aux travaux pénibles et produisent du lait et de la viande en autoconsommation familiale. La saillie est un échange entre voisins. L'un loue son taureau pour la vache de l'autre et le patrimoine génétique des 80 pionnières se diffuse ainsi, sans règles ni ambition d'amélioration du cheptel. Tout change au XIXe siècle, en Angleterre. Les éleveurs de Durham, à l'est de l'île, rédigent en 1822 le premier « herd book » (livre généalogique) pour encadrer l'évolution d'une race, la shorthorn, dont certaines lignées sont sélectionnées pour la viande, d'autres pour le lait. Après la première domestication en Anatolie, c'est le deuxième goulet d'étranglement. Les éleveurs sélectionnent les mâles qui développent le plus les caractères recherchés et éliminent les autres de la reproduction. Ces techniques d'élevage vont se diffuser lentement. En France, c'est sous la IIIe République que sont fondées les « sociétés d'élevage ». Jusqu'à la fin de la Seconde Guerre mondiale, où l'agriculture sort de son ère paysanne pour entrer dans l'industrialisation.

La loi du 28 décembre 1966 codifie l'usage des nouvelles technologies. La sélection animale utilise désormais trois outils principaux: le contrôle de la performance de chaque animal qui permet d'évaluer leur potentiel de production, les index de sélection pour retenir les meilleurs pour la reproduction et enfin l'insémination artificielle, qui permet de diffuser la semence des meilleurs reproducteurs et d'organiser ainsi des plans d'accouplement. La loi de 1966 s'intéresse aux races les plus productives et préconise la disparition des petites races locales aux performances médiocres.

C'est le troisième goulet d'étranglement. Et cette fois-ci, la perte de diversité génétique est abyssale. Les meilleurs taureaux reproducteurs se retrouvent pères de milliers de vaches, si bien que le brassage génétique devient inexistant avec des risques accrus de consanguinité *(lire l'encadré ci-contre)*. Ainsi, chez la vache montbéliarde, une génisse qui naît aujourd'hui a de fortes chances de n'avoir qu'un seul grand-père, géniteur de son père et de sa mère. De plus, en système industriel, la concentration d'animaux proches génétiquement favorise le développement des maladies. Dans le monde, 20 % de la production animale est perdue à cause des virus et bactéries. En France, 80 % des jeunes bovins sont vaccinés contre les pathologies respiratoires qui se diffusent à grande échelle et 30 % des vaches allaitantes sont vaccinées contre les diarrhées néonatales.

50 races bovines
dont 12 comptent moins de 1000 têtes.

897
millions de tonnes de lait produites dans le monde en 2022 (+22 % par rapport à 2000).

71,6 millions
de tonnes
de viande bovine produites dans le monde en 2022 (+22 % par rapport à 2000).

SOURCES : OCDE-FAO

Un encouragement à restaurer les races rustiques

Est-ce la fin d'un modèle intensif? Les grands troupeaux sont encore largement majoritaires dans les deux Amériques et en Australie. L'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) plaide aujourd'hui pour des élevages moins concentrés qui fassent une place importante au bien-être des animaux et travaille à la restauration des races rustiques qui possèdent peut-être les gènes permettant d'adapter les bovins au changement climatique. La vache est à l'orée d'un nouveau chapitre de son histoire. ■

Loïc Chauveau

Alimentation, sport, sommeil... Booster son immunité

Notre système de lutte contre les agressions extérieures se construit dès la naissance, atteint son efficacité maximale à l'âge adulte avant de se fragiliser avec la vieillesse. Dans ce dossier spécial, « Sciences et Avenir » a interrogé les meilleurs spécialistes qui prodiguent leurs conseils pour renforcer nos défenses naturelles.

Dossier réalisé par Sylvie Boistard, Cécile Coumau, Estelle Dautry, Camille Gaubert, Nicolas Gutierrez C., Pierre Kaldy, Hervé Ratel (avec Sylvie Riou-Milliot)

SOMMAIRE

INTRODUCTION Le système immunitaire à tous les âges p. 52 **ALIMENTATION** Bien composer son assiette pour résister aux agressions p. 55 **SPORT** Les bienfaits de l'activité physique p. 58 **SOMMEIL** Un repos protecteur p. 60 **MICROBIOTE** Les bactéries intestinales en première ligne p. 62 **VACCINS** Un allié de poids qui fait sa révolution p. 64 **CANCER** Les nouvelles armes de l'immunothérapie p. 67

MOHAMMED ELAMINE ALIOUI / GETTY IMAGES - BRUNO LEVY/DIVERGENCE POUR SCIENCES ET AVENIR

Nadine Cerf-Bensussan, Grand Prix Inserm 2023

Alain Fischer, professeur émérite au Collège de France

Gérard Eberl, immunologue à l'Institut Pasteur de Paris

Le système immunitaire à tous les âges

Chaque étape de la vie forme notre réponse aux maladies et aux agents pathogènes. Et si certains passent l'hiver sans un rhume tandis que d'autres sont toujours fébriles au printemps, c'est que personne n'a le même système immunitaire. Nos défenses naturelles dépendent de nombreux critères et, surtout, évoluent au cours de notre vie.

Les premières années

Si le nouveau-né a un système immunitaire encore immature, son développement a démarré tôt durant la grossesse. *« Le thymus, l'organe producteur de nos lymphocytes T, des globules blancs chargés de repérer et de détruire les cellules infectées de notre corps, se développe à partir de neuf semaines de grossesse.*

BRUNO LEVY/DIVERGENCE POUR SCIENCES ET AVENIR

Quant aux lymphocytes B, à l'origine de nos anticorps, ils commencent à être produits dans la moelle osseuse autour de neuf semaines. Même si les lymphocytes T et B sont produits pendant la grossesse, ils ne mûrissent complètement qu'après la naissance, lors d'une exposition à des antigènes étrangers », détaille Martin Larsen, directeur de recherche au Centre d'immunologie et des maladies infectieuses, à Paris. L'hématopoïèse, le processus par lequel sont produites les cellules sanguines et toutes les cellules de notre système immunitaire, se met en place également très tôt.

Par ailleurs, la mère transfère *in utero* des anticorps, les immunoglobulines G (IgG), par le placenta. Nous naissons ainsi avec un taux d'anticorps IgG — le plus répandu dans le sang — quasiment égal à celui d'un adulte (10 mg/ml). Mais comme le nourrisson n'est pas encore capable de produire lui-même des IgG, leur taux chute et il faudra attendre cinq à six mois avant que l'organisme du nouveau-né prenne le relais, et deux ans pour retrouver la normalité. *« L'enfant qui naît n'est plus protégé par le placenta. Ses premières expositions à l'environnement extérieur ont un impact très fort sur son développement. Un phénomène que l'on appelle imprinting néonatal* », décrit Gérard Eberl, immunologue à l'Institut Pasteur, à Paris.

Grâce à l'allaitement, la mère est capable de continuer à transférer des anticorps

> “ Nous grandissons différents également du point de vue immunitaire. Cette diversité est un atout, elle assure la résistance des uns lors des pandémies, ou des autres face aux maladies chroniques ”
>
> **Gérard Eberl,** immunologue, responsable du laboratoire Microenvironnement et immunité à l'Institut Pasteur, à Paris

OLIVIER ROSSI; GETTY IMAGES

Le développement du système immunitaire chez le tout-petit est dicté par des facteurs comme l'alimentation, la rencontre avec des pathogènes... Jusqu'à 30-35 ans, la capacité de l'organisme adulte à fournir des cellules protectrices tourne à plein régime, puis elle commence à ralentir, le corps devenant moins résistant pour contrer infections et maladies.

à l'enfant et, donc, de le protéger contre les infections virales. Que se passe-t-il chez les bébés nourris au biberon ? *« Notre équipe a pu démontrer que si le nourrisson n'est pas allaité, des anticorps IgA* [une autre famille d'immunoglobulines particulièrement importante pour protéger les muqueuses] *apparaissent rapidement, avant un mois de vie »*, explique Martin Larsen. Mais le système immunitaire n'est pas mature. *« On sait par exemple que le risque d'allergie est plus élevé chez les enfants non allaités »*, poursuit le chercheur.

La suite se passe dans le tube digestif. Chez le nouveau-né, le microbiote intestinal, qui joue un rôle crucial dans le développement et le fonctionnement du système immunitaire, est d'abord formaté par les composantes du lait, maternel ou non. La diversification alimentaire, qui commence vers les quatre à six mois de vie de l'enfant, va contribuer au développement du microbiote. Environ 80 % des cellules immunitaires de l'organisme se trouveront *in fine* dans le système gastro-intestinal. Une fois l'alimentation diversifiée, c'est le chemin de vie et les différentes rencontres avec des antigènes, des pathogènes, des bactéries, des virus, des parasites, des champignons... mais aussi, bien sûr, le parcours vaccinal qui vont éduquer le système immunitaire de l'être humain.

Faut-il protéger l'enfant à tout prix des maladies ? Selon la théorie de l'hygiène, exposée en 1989 par l'épidémiologiste britannique David Strachan, la surprotection des nourrissons est contreproductive. Il suggère qu'un mode de vie trop aseptisé durant la petite enfance empêche le système immunitaire de se développer correctement et augmente le risque d'allergie. *« Il y a un danger à s'exposer au monde, mais ce n'est que par cette exposition qu'un nourrisson va grandir et se rendre plus robuste »*, soutient Gérard Eberl. Il nuance pourtant : *« Si on a une infection grave, il y aura des séquelles, pas seulement dans le système immunitaire, mais aussi dans les organes. Elles peuvent prédisposer à une maladie. Entre l'apprentissage, se rendre plus résilient et les séquelles, la frontière est ténue. »*

L'âge adulte

Chaque humain a un début de vie distinct : lait maternel ou biberon, coliques, infections, etc. *« Ainsi nous*

grandissons différents aussi du point de vue immunitaire. Certains seront par conséquent mieux armés contre tel virus, alors que d'autres le seront davantage contre une maladie chronique. Cette diversité immunitaire est un atout, elle assure la résistance des uns lors des pandémies, ou des autres face aux maladies chroniques », appuie Gérard Eberl.

La souplesse du système immunitaire humain reste l'une de ses forces. À l'âge adulte, notre corps fonctionne à plein régime. C'est aux alentours des 30-35 ans que le système commence un peu à s'essouffler. Delphine Sauce, codirectrice de l'équipe microbiote et trajectoires immunitaires au Centre d'immunologie et des maladies infectieuses (Inserm, CNRS, Sorbonne Université), détaille : *« Le thymus tourne à plein régime jusqu'à la puberté. Avec la baisse de production d'hormones de croissance, la composition du thymus se modifie, l'usine à lymphocytes T tourne moins. Notre capacité à fournir des cellules pour l'immunité adaptative diminue au fil du temps et nous nous reposons sur nos acquis.* » Ce sont — déjà ! — les prémices de l'immunosénescence. La bonne nouvelle, c'est que l'on a alors constitué notre mémoire immunitaire. L'immunité innée réagit quand elle croise un pathogène déjà rencontré. C'est ensuite l'immunité adaptative, qui est censée prendre le relais pour une réponse ciblée. En vieillissant, c'est cette dernière qui peut commencer à faire défaut.

S. KAULITZKI/SPL/SUCRÉ SALÉ

Le thymus est l'organe producteur des lymphocytes T, cellules clés de notre immunité. Après l'adolescence, il diminue sa production.

Les personnes âgées

Avec l'âge, le système immunitaire montre des signes d'essoufflement. Notre moelle osseuse, garante de notre hématopoïèse, devient plus graisseuse, moins efficace. Les vieilles cellules fonctionnent moins bien et dans certains organes comme le foie et les reins, les cellules meurent et ne sont pas remplacées. Chez les personnes âgées, les infections peuvent donc être plus graves. Surtout, c'est l'ensemble du corps qui vieillit, avec une perte de masse musculaire (sarcopénie), l'apparition de l'ostéoporose, de maladies chroniques, accompagnées parfois d'une prise de poids excessive… *« Ces comorbidités venant avec l'âge provoquent une inflammation continue et à bas bruit dans tout notre corps,* explique Delphine Sauce. *C'est ce qu'on appelle l'inflamm'aging* [un terme inventé au début des années 2000 par Claudio Franceschi, professeur d'immunologie à l'université de Bologne, en Italie]. »

Un phénomène que le *Time magazine* appelait déjà il y a vingt ans *« The secret killer »* (le tueur secret). Le système immunitaire est stimulé en continu. C'est notamment le cas avec la persistance de certains virus tels que les herpès ou le cytomégalovirus (CMV), dont l'infection est pourtant le plus souvent bénigne. Une étude longitudinale suédoise montrait en 2000 que le simple fait d'être infecté par le CMV réduisait l'espérance de vie de deux ans. Or, plus de 50 % des adultes le sont et plus de 80 % des personnes âgées. *« Le système immunitaire se concentre en grande partie sur cette infection, s'épuise et a plus de difficultés à lutter contre d'autres »*, détaille Delphine Sauce.

Le point commun des zones où l'on trouve le plus de centenaires dans le monde ? *« Au-delà de la part génétique indéniable, il y a l'activité physique adaptée. Ils cuisinent, se déplacent, sont intégrés à leur environnement. Alors, inutile de se rendre au Costa Rica, en Sardaigne ou au Japon. Il faut commencer par ne pas rester sédentaire chez nous »*, conseille Delphine Sauce. ■ **E. D.**

PRÉVENTION

Alerte aux nouveaux pathogènes

Qui dit voyage, dit rencontres avec des virus inconnus de notre organisme. Une formalité pour des systèmes immunitaires jeunes et vigoureux. Mais *« en vieillissant, nous produisons moins de cellules, et de moins bonne qualité »*, alerte Delphine Sauce, directrice de recherche à l'Inserm. À partir de 70 ans, le système immunitaire est moins efficace pour fabriquer de nouvelles réponses à de nouveaux pathogènes comme le virus Zika ou le chikungunya, par exemple. Pour preuve, la grippe tue tous les ans, même si on l'a déjà contractée et que notre système immunitaire pourrait sembler adapté, car il s'agit à chaque fois de nouvelles souches virales.

ALIMENTATION

Bien composer son assiette pour résister aux agressions

Renforcer ses défenses, c'est aussi agir sur son alimentation. Variée et diversifiée, elle apporte tous les nutriments nécessaires essentiels au bon fonctionnement du système immunitaire.

Kiwis riches en vitamine C pour prévenir les infections virales, thé aux champignons pour renforcer ses défenses anticancéreuses, infusions de gingembre pour stimuler son immunité… Au-delà de ces allégations à but commercial, les laboratoires mettent en lumière plusieurs liens entre alimentation et immunité. *« Manquer de certains nutriments ou micronutriments peut en effet rendre plus fragile face aux diverses agressions (virus, bactéries, etc.) en altérant la production de certaines cellules immunitaires »*, pose Adrien Rossary, chercheur dans l'Unité de nutrition humaine (Inrae/université Clermont Auvergne). Une carence peut aussi favoriser une inflammation de bas grade, laquelle est reconnue comme une voie vers de nombreuses pathologies (affections cardiaques, obésité, diabète). Changer d'alimentation pourrait ainsi modifier le statut immunitaire, comme l'ont constaté aux États-Unis des chercheurs de l'Institut national des allergies et des maladies infectieuses (Niaid), en collaboration avec l'Institut national du diabète et des maladies digestives et rénales (NIDDK). En proposant à 20 adultes de suivre pendant deux semaines un régime cétogène (riche en lipides et faible en sucres)

ALVAREZ / GETTY IMAGES

ou végétalien (sans produit d'origine animale, riche en fibres et pauvre en graisses), les chercheurs américains ont constaté dans leurs travaux, parus en 2024 dans *Nature Medicine,* que le passage à l'un ou l'autre régime alimentaire était lié à des changements évidents dans le nombre de cellules immunitaires.

Ne pas faire l'impasse sur les protéines

Avec le régime cétogène, les quantités et l'activité des lymphocytes T et B — des globules blancs de l'immunité adaptative — ont augmenté, tandis que les personnes qui suivaient un régime végétalien ont constaté une amélioration des réponses immunitaires innées, non spécifiques. De quoi encourager les chercheurs à poursuivre dans cette voie. Avec, toutefois, une nuance en tête. *« La littérature montre qu'il n'existe pas d'aliments miracles,* fait remarquer Adrien Rossary. *C'est à travers une alimentation diverse et variée que l'organisme peut puiser les nutriments dont il a besoin pour soutenir le système immunitaire.* »

Et la viande rouge ne fait pas exception à cet état de fait. Si elle est une source d'acides gras saturés et d'oméga-6, qui, consommés en excès, sont pro-inflammatoires, une carence en acides aminés (composants des protéines) rend en revanche le système immunitaire moins efficace. *« Pour contrer une infection virale ou bactérienne, l'organisme a besoin de protéines pour fabriquer très rapidement de nouvelles cellules leucocytaires par millions »*, précise Adrien Rossary. Veau, bœuf, agneau et foie sont bien dotés en fer, dont un déficit rend plus vulnérable aux infections. La viande rouge, la volaille et les abats sont aussi une bonne source de vitamine B12, utile au bon fonctionnement de certains lymphocytes T, et de zinc, un cofacteur de la synthèse des protéines.

Côté fruits et légumes, leur richesse en fibres prébiotiques nourrit les bactéries intestinales. Ils soutiennent ainsi le microbiote et contribuent à diminuer l'état inflammatoire de bas grade. Ils sont aussi bien pourvus en composés antioxydants (polyphénols, vitamine C, sélénium, zinc), qui luttent contre le stress oxydatif, déclencheur de l'inflammation. La provitamine A (mangue, carotte, potiron, etc.) aide même à réguler le nombre et la fonction des cellules « natural killers » (NK), des globules blancs capables d'identifier les cellules infectées ou cancéreuses et de les détruire. Légumes, fruits frais et à coque apportent aussi de la vitamine E (fruits rouges, pommes), laquelle entre dans la composition de la membrane des cellules immunitaires. De son côté, la vitamine C (agrumes, kiwi) soutient notamment la migration des globules blancs vers les sites d'infection et la production d'anticorps.

DEMAERRE/GETTY IMAGES

Parmi les aliments à éviter, les produits ultratransformés (ici un jus d'orange à base de concentré) qui contiennent des sucres et additifs affaiblissant le système immunitaire.

ÉTUDE

Les effets à long terme du tabagisme

Tabac et immunité ne font décidément pas bon ménage. Ainsi, même chez un ancien fumeur, le système immunitaire présente des signes de perturbations et ce jusqu'à quinze ans après l'arrêt. Tel est l'un des enseignements d'une étude française publiée dans la revue *Nature* en 2024, qui démontre pour la première fois que fumer affecte durablement le système immunitaire. Menée par l'Institut Pasteur sur des échantillons sanguins de 1000 volontaires âgés de 20 à 70 ans, elle met en évidence un double effet du tabagisme, l'un à court terme sur les réponses immunitaires dites innées (les mécanismes de défense), et un autre à long terme, sur celles dites adaptatives, élaborées au cours du temps en fonction des contacts avec les microbes. Selon les chercheurs, ces résultats auraient aussi des implications cliniques potentielles sur le risque de développer des infections, des cancers ou des maladies auto-immunes. S. R.-M.

Autre apport alimentaire incontournable pour une immunité performante : les poissons gras et les fruits de mer. Saumon, maquereau et sardine sont ainsi riches en acides gras poly-insaturés de type oméga-3, connus pour leurs propriétés anti-inflammatoires. Selon des travaux japonais, ils donneraient naissance aux protectines, des molécules pouvant atténuer la réplication du virus de la grippe.

Miser sur les aliments lactofermentés

Les fruits de mer (huîtres, coquille Saint-Jacques, moules, etc.) sont, eux, riches en sélénium et en zinc, deux puissants antioxydants. Le sélénium augmente notamment l'activité des cellules NK, tandis *« qu'un manque de zinc diminue le nombre de lymphocytes T et B et augmente le risque d'infections »*, note Véronique Liesse, diététicienne-nutritionniste. Utilisé à des fins de prévention, le zinc réduirait de 28 % le risque de contracter un rhume et de 68 % une maladie « pseudo-grippale ».

Les produits de la mer, notamment les poissons gras, apportent aussi de la vitamine D. Également synthétisée par la peau lors de l'exposition au soleil, celle-ci active notamment les lymphocytes T régulateurs qui empêchent le système immunitaire de s'emballer. Selon une étude publiée en 2024 dans la revue *Science*, menée sur des souris par des biologistes du Francis-Crick Institute à Londres (Royaume-Uni), la vitamine D renforcerait même la réponse immunitaire face au cancer en influençant la composition du microbiote intestinal par l'augmentation des bactéries *Bacteroides fragilis*. *« Il y a un véritable dialogue entre le microbiote et le système immunitaire au niveau de l'intestin, qui favorise la défense de l'organisme* [lire aussi p. 62]. *Toutefois, ces travaux doivent se confirmer pour savoir si cet effet bénéfique peut être transposable à l'humain »*, note Adrien Rossary, qui travaille sur les liens entre cette vitamine, l'obésité et le cancer.

VERBATIM

LUC CYNOBER PROFESSEUR HONORAIRE DE NUTRITION À L'UNIVERSITÉ PARIS CITÉ

Attention aux substances « immunostimulantes »

LUC CYNOBER

“L'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation (Anses) met en garde contre des compléments alimentaires contenant des substances « immunostimulantes » telles que le saule, la reine-des-prés, le curcuma ou la réglisse. Elles perturberaient les défenses immunitaires naturelles de l'organisme. De manière générale, à moins d'une carence cliniquement établie, il n'y a pas lieu de prendre des compléments de zinc, de cuivre ou de sélénium. Tous les nutriments ont des doses de sécurité, au-delà desquelles il peut y avoir un effet toxique. Un excès de vitamine E aura l'effet inverse de celui escompté, car il met au repos le système immunitaire, avec, *in fine*, des risques d'affections. Le cuivre, au-delà des doses physiologiques, a un effet pro-oxydant. Quant à la vitamine C, elle peut favoriser la formation de calculs rénaux d'oxalate.”

Dans cette optique du dialogue entre immunité et microbiote, il est ainsi pertinent de miser sur les aliments lactofermentés, riches en probiotiques (lactobacilles, bifidobactéries…). Qu'il s'agisse de fruits et légumes (pickles, choucroute, kimchi coréen, olives noires, etc.), ou de boissons et produits laitiers fermentés (kombucha, lait ribot, yaourt, croûtes de fromage, etc.), ce type d'aliments entretient en effet l'équilibre du microbiote, favorise la sécrétion de cytokines anti-inflammatoires et renforce la barrière intestinale. *« Les bactéries intestinales permettent de produire des acides gras à chaîne courte et une couche épaisse de mucus, lequel fabrique des cellules immunitaires (immunoglobulines A), offrant un effet barrière optimal contre les agents infectieux »*, précise Véronique Liesse.

À côté de ces alliés objectifs, le système immunitaire fait aussi face à quelques ennemis à surveiller de près : l'alcool, le sel, les sucres ajoutés, les gras saturés et les additifs — dont les émulsifiants, qui altèrent le microbiote. Des ingrédients très présents dans les plats ultratransformés. Raison pour laquelle ces derniers tendent à favoriser une inflammation chronique de bas grade qui affaiblit le système immunitaire en le sursollicitant. En 2020, des chercheurs de l'hôpital universitaire de Bonn (Allemagne) ont montré qu'une consommation quotidienne excessive de sel pendant une semaine inhibait l'action des granulocytes neutrophiles, des cellules qui attaquent les bactéries. De même, la consommation excessive d'alcool (plus de 10 verres par semaine) réduit la production de cytokines — des molécules qui déclenchent les réactions immunitaires — et affecte le microbiote en favorisant l'inflammation et l'hyperperméabilité intestinales. *Idem* pour le sucre qui, en excès, entraîne une perte de lymphocyte Th17, des cellules de défense contre les pathogènes retrouvées au niveau de la barrière intestinale. ■

S. B.

KZENON/GETTY IMAGES

SPORT

Les bienfaits de l'activité physique

Pratiquer une activité physique modérée de façon régulière stimule des cellules protectrices contre les agents infectieux et diminue l'inflammation due au stress, à l'âge ou à des maladies.

« *L'être humain est fait pour rester actif. Malheureusement, nous devenons sédentaires et nous n'utilisons plus notre organisme à son plein potentiel* », affirme Barbara Crisol, chercheuse au Centre de recherche en myologie (Paris). Tout comme un engrenage bien huilé fonctionne mieux, le système immunitaire est plus efficace lorsque l'organisme est soumis à une activité physique régulière et d'intensité modérée. « *Pendant l'exercice, la fréquence cardiaque et donc la circulation sanguine augmentent et transportent plus facilement les cellules du système immunitaire sur un site d'infection, un cancer ou une blessure* », explique Delphine Sauce, qui dirige l'équipe Microbiote et trajectoires immunitaires à l'Inserm. En outre, l'exercice augmente la production par la glande surrénale de catécholamines, ces hormones du stress que sont l'adrénaline, le cortisol et la noradrénaline. « *Les catécholamines stimulent le débit cardiaque et aident les cellules immunitaires à se décrocher des parois des vaisseaux sanguins pour les faire circuler* », précise le Dr Stéphane Bermon, médecin du sport et ancien président de la Société internationale d'exercice et d'immunologie (Isei). Certaines cellules immunitaires possèdent même des récepteurs spécifiques aux catécholamines, les rendant plus efficaces pour traquer les cellules cancéreuses ou les agents infectieux.

Alors que les hormones circulent, les muscles sous effort produisent de l'interleukine-6 (IL-6), une protéine habi-

tuellement pro-inflammatoire mais qui, dans ce cas-là, a l'effet inverse. *« Plus l'exercice physique recrutera de muscles, plus il sera intense et plus la quantité de protéines sécrétées sera importante »*, précise Barbara Crisol. L'action anti-inflammatoire de l'IL-6 est particulièrement bénéfique, car si l'inflammation est une réaction immunitaire utile en première ligne face à une menace (infection, blessure, etc.), elle devient délétère lorsqu'elle est chronique ou prolongée. *« L'exercice diminue l'inflammation liée par exemple au stress, à l'âge ou à des maladies et aura probablement un effet protecteur sur la santé globale de l'individu »*, affirme Delphine Sauce.

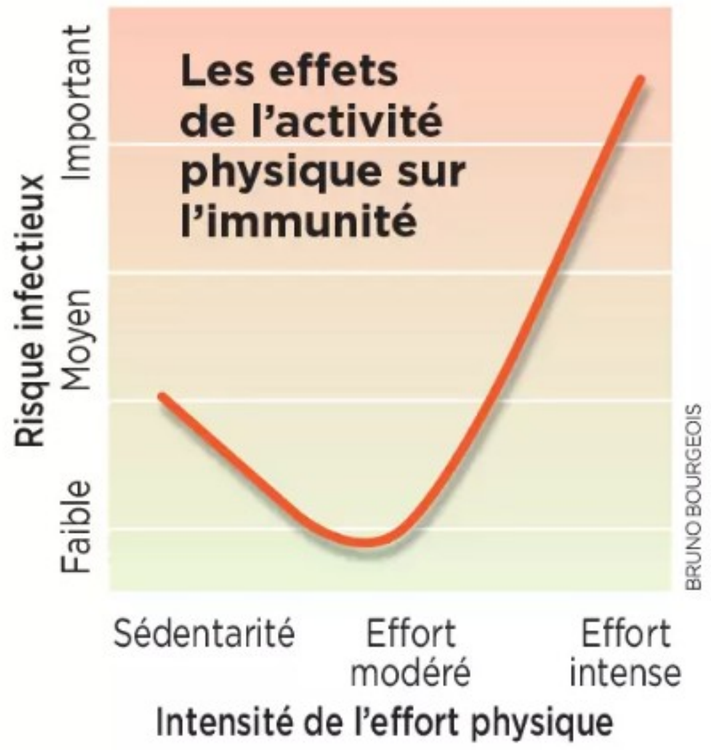
Un effet protecteur sur les neurones

Outre l'IL-6, le facteur de croissance BDNF (pour brain-derived neurotrophic factor) est également produit dans le cerveau en réponse à l'exercice physique. *« On pense que ce facteur est protecteur pour les neurones »*, explique Bertrand Fontaine, responsable du service de neuromyologie à l'Institut de myologie, à Paris. Cela pourrait être selon lui un des mécanismes par lesquels l'activité physique préserve la mémoire dans la maladie d'Alzheimer. Pour la maladie de Parkinson, autre pathologie neurodégénérative sur laquelle les effets de l'exercice ont été bien documentés, la kinésithérapie est même prise en charge à 100 %.

« L'activité physique est à la fois un outil de prévention et de traitement… Et sans aucun effet secondaire ! », appuie Barbara Crisol. L'exercice permet notamment de diminuer le risque d'infection respiratoire, ne serait-ce qu'en limitant les interactions avec les agents infectieux. *« Vous videz vos poumons de tout ce qu'ils contiennent, vous augmentez votre transit et vous allez probablement agir sur l'équilibre de votre microbiote »*, recense Bertrand Fontaine. Depuis les années 2000, des travaux de grande ampleur démontrent que l'activité physique permet de réduire de 33 % la mortalité toutes causes confondues — en particulier de 35 % la mortalité cardio-vasculaire —, de 20 % le risque de développer une démence, de 14 % pour la maladie d'Alzheimer, et même de 58 % pour le risque de diabète ! *« Ces bénéfices sont plus importants qu'avec n'importe quel agent thérapeutique existant »*, pointe Stéphane Bermon. Une activité physique adaptée diminue le taux de récidive de cancer du sein de 24 %, rapporte la fondation ARC pour la recherche contre le cancer.

L'Organisation mondiale de la santé recommande 2 h 30 min d'activité physique modérée par semaine réparties sur trois séances, ainsi que deux séances de renforcement musculaire. *« Modérée, cela signifie qu'on peut continuer à parler pendant l'exercice,* précise Delphine Sauce. *Marcher, monter des escaliers, faire de la natation, c'est toute l'hygiène de vie qui va avec qui importe. »*

Adapter son activité physique est essentiel pour en récolter les bénéfices. Car lorsque l'effort est trop intense au regard des capacités de l'individu, il crée au contraire une période de dépression immunitaire pendant plusieurs heures à plusieurs jours. Durant cette période critique, le corps semble plus vulnérable aux infections, en particulier respiratoires. *« Quand votre grand-mère vous disait de vous couvrir après l'effort, elle n'avait pas tort ! »*, s'amuse Stéphane Bermon. Une récente étude suggère cependant que, s'il y a effectivement moins de cellules immunitaires dans le sang après un effort intense, elles n'ont pas disparu. *« On les retrouve au niveau des organes sensibles comme les poumons »*, explique Delphine Sauce. Il s'agit peut-être d'une relocalisation des cellules immunitaires restantes vers des sites plus sensibles aux intrusions.



Un exercice physique modéré diminue le risque d'infection des voies respiratoires supérieures, contrairement à un effort prolongé et intensif.

Récupérer après un effort physique trop intense

« Les effets de l'activité physique sur l'immunité dans le temps décrivent une courbe en "J" », explique Stéphane Bermon. D'intensité modérée, l'activité physique diminue le risque infectieux par rapport à la sédentarité. Très intense, elle cause en revanche un stress rendant l'organisme temporairement vulnérable, d'autant plus si les efforts s'enchaînent sans période de récupération *(voir la courbe ci-dessus)*. Accompagnée d'œdèmes (accumulation de liquide), l'inflammation est d'ailleurs visible à l'IRM après un effort trop intense, signe ▸

AFM-TÉLÉTHON / F. BELONCLE

« Vous videz vos poumons, vous augmentez votre transit et vous allez probablement agir sur l'équilibre de votre microbiote »

Bertrand Fontaine, responsable du service de neuromyologie à l'Institut de myologie (Paris)

de courbatures, explique Benjamin Marty, coresponsable du laboratoire d'imagerie de l'Institut de myologie, à Paris.

Pour que les effets négatifs d'un effort intense s'estompent, il est indispensable d'observer une période de récupération dans les jours qui suivent l'exercice, rappelle Delphine Sauce. *« Les microlésions des muscles en surrégime et l'hyperinflammation entraînent la sécrétion de résidus de stress oxydatif, qui participent à un système de boucle inflammatoire, un signal de danger. »* Dans les cellules musculaires, le repos permet aux mitochondries — les centrales énergétiques cellulaires — de repasser à un système de production d'énergie qui ne relâche plus de stress oxydatif. Une reprogrammation qui agit *« un peu comme un extincteur après un incendie »*, illustre Delphine Sauce.

Une meilleure réponse vaccinale est observée

Heureusement, le corps s'adapte. *« Les cellules musculaires ont une mémoire, une faculté d'adaptation,* explique Barbara Crisol. *La première fois que vous faites un effort physique, le corps le perçoit comme un stress. Mais jour après jour, cela finit par ne plus être le cas. »* Pour cette raison, la régularité de la pratique de l'activité physique est la clé de cette adaptation. *« Les personnes âgées qui régulièrement marchent, jardinent ou font de la natation, par exemple, ont aussi une meilleure réponse vaccinale »*, révèle Delphine Sauce. Après le vaccin contre la grippe notamment, il a été montré que les anticorps produits chez les personnes âgées actives durent beaucoup plus longtemps et protègent mieux, ajoute-t-elle. Certaines études suggèrent même que l'exercice physique juste avant ou juste après un vaccin pourrait renforcer son efficacité ! ■ **C. G.**

STELLA MAI / PLAINPICTURE

Les enfants qui ne dorment pas assez ont une production accrue de certaines cytokines, des molécules inflammatoires liées à des maladies.

SOMMEIL

Un repos protecteur

Des recherches récentes ont enfin élucidé les mécanismes physiologiques expliquant l'impact du sommeil sur le système immunitaire. Ces découvertes soulignent l'importance d'un sommeil de qualité pour renforcer nos défenses naturelles.

L'influence du sommeil sur le système immunitaire ne fait plus l'ombre d'un doute. *« Les études établissant un lien entre mauvaises qualité ou quantité de sommeil et maladies infectieuses ne manquent pas »*, pose Sabine Plancoulaine, directrice de recherche à l'Inserm. Il y a dix ans déjà, une étude parue dans la revue *Sleep* révélait que les personnes dormant moins de 6 heures par nuit avaient 4,2 fois plus de risques d'attraper un rhume que des dormeurs de plus de 7 heures. En 2023, un très large essai sur 600 000 insomniaques paru dans *eBioMedicine* enfonçait le clou : le risque de développer une infection respiratoire est multiplié par six. Les auteurs en concluaient que *« le sommeil de mauvaise qualité chronique est un facteur de risque causal pour contracter des infections respiratoires et contribue également à la gravité de ces infections. Ces résultats soulignent le rôle du sommeil dans le maintien d'une réponse immunitaire suffisante contre les agents pathogènes. »* Une méta-analyse parue en 2023 a aussi confirmé que les personnes ayant moins de 6 heures de sommeil par nuit développaient moins d'anticorps à la suite d'une vaccination antigrippale.

Si une mauvaise qualité de sommeil diminue donc nos défenses immunitaires, passer suffisamment de temps dans les bras de Morphée, à l'inverse, aide à

récupérer, comme vient de le démontrer pour la première fois une étude parue dans *Nature*. Des chercheurs de l'hôpital Mont Sinaï à New York (États-Unis) ont observé chez des souris qu'après une crise cardiaque, le cœur envoie des signaux au cerveau pour augmenter la quantité de sommeil et favoriser la guérison. « *Nous avons découvert que la neuro-inflammation et le recrutement de cellules immunitaires appelées monocytes dans le cerveau après un infarctus sont une réponse bénéfique et adaptative qui augmente le sommeil pour permettre la guérison du cœur et réduire l'inflammation cardiaque* », a déclaré l'auteur principal, Cameron McAlpine.

Un lien établi entre déficit de sommeil et inflammation

Ce lien entre déficit de sommeil et production accrue de cytokines, des molécules pro-inflammatoires, a même été démontré chez l'enfant. « *Il suffit d'une durée de sommeil dans la limite inférieure de la normalité pour voir apparaître ces marqueurs de l'inflammation* », indique Sabine Plancoulaine, qui a coordonné ces travaux. Les résultats publiés en 2022 montrent qu'une durée de sommeil plus courte ou changeante entre 2 et 5 ans est associée à des niveaux accrus de deux cytokines essentielles à l'immunité, l'interleukine-6 et TNF alpha, à l'âge de 5 ans. « *Reste maintenant à savoir si une inflammation de bas grade à long terme pourrait provoquer l'apparition de troubles de santé ultérieurs.* »

Malgré ces multiples constats, les mécanismes physiologiques expliquant l'impact du sommeil sur le système immunitaire n'étaient pas encore bien compris. C'est pourquoi des travaux récents, publiés en novembre dans la revue *Nature*, constituent une étape importante. Une équipe dirigée par la Pr Luciana Besedovsky, de l'Institut de psychologie médicale à Munich (Allemagne), a étudié la concentration dans le sang de différentes sous-populations de cellules immunitaires — les cellules T — chez des volontaires sains, pendant deux sessions de 24 heures. Lors de la première session, les participants ont dormi pendant huit heures ; durant la seconde, ils sont restés alités, mais sans dormir. Un cathéter placé sur l'avant-bras permettait de prélever des échantillons de sang sans interrompre leur sommeil. L'analyse des échantillons sanguins a révélé des différences significatives entre les conditions de test, et les résultats montrent que le sommeil améliore le potentiel migratoire des cellules T vers les ganglions lymphatiques. Or, cette migration des cellules T est cruciale, car c'est dans ces organes qu'elles rencontrent des antigènes et apprennent à reconnaître les agents pathogènes. Quelques mois auparavant, la même équipe avait identifié une autre pièce du puzzle. Ils avaient découvert que le sommeil améliore la capacité des cellules T à se fixer à leurs cibles, comme les cellules infectées par un virus. Et cela grâce à une protéine, l'intégrine, qui est activée pendant le sommeil. À l'inverse, en cas de sommeil perturbé ou insuffisant, la machine se grippe car la sécrétion de noradrénaline et d'adrénaline empêche les cellules T d'activer l'intégrine.

Des recommandations à suivre dès la petite enfance

Face à la robustesse des liens entre sommeil et immunité, « *il semble évident que cela plaide pour un respect des recommandations sur la durée de sommeil à tous les âges, et cela dès la petite enfance* », insiste Sabine Plancoulaine. Et le recours à la sieste pourrait s'avérer salutaire. Une étude menée par Brice Faraut, chercheur à l'université Paris Cité, a mis en évidence qu'une sieste de 30 minutes chez des personnes en dette de sommeil réduisait le stress et l'inflammation. Le niveau d'interleukine-6, une protéine ayant des propriétés antivirales, revenait à la normale. Les dégâts causés sur l'immunité par le manque de sommeil semblent donc réversibles. « *Les personnes traitées pour un syndrome d'apnée du sommeil voient leur niveau d'inflammation diminuer* », rappelle la chercheuse. ■ **C. C.**

CRESS

« Les personnes traitées pour un syndrome d'apnée du sommeil voient leur niveau d'inflammation diminuer »

Sabine Plancoulaine, spécialiste du sommeil, directrice de recherche à l'Inserm

GÉNOME

Nous devons à Neandertal une part de notre immunité

Bien que disparu il y a 40 000 ans, l'homme de Neandertal a laissé quelques souvenirs dans notre génome. Nous lui devons entre 1 et 6 % de notre ADN, ont montré plusieurs études. Dont quelques gènes essentiels dans le contrôle de notre défense immunitaire. En effet, en se métissant avec son cousin du continent européen, *Homo sapiens* a hérité de récepteurs cellulaires très efficaces pour répondre aux bactéries et champignons parasites qui sévissent alors en Europe et en Asie occidentale. Un legs qui a sans nul doute permis au nouveau venu de s'adapter plus efficacement et rapidement au climat, à la nourriture et aux pathogènes locaux. Revers de la médaille génétique : ce faisant, l'être humain moderne a également récolté une prédisposition aux allergies… H. R.

MICROBIOTE

Les bactéries intestinales en première ligne

Les milliards de micro-organismes qui peuplent les intestins ont un effet bénéfique direct sur le système immunitaire. Ils protègent contre les pathogènes et permettent à l'organisme de répondre plus efficacement à un traitement.

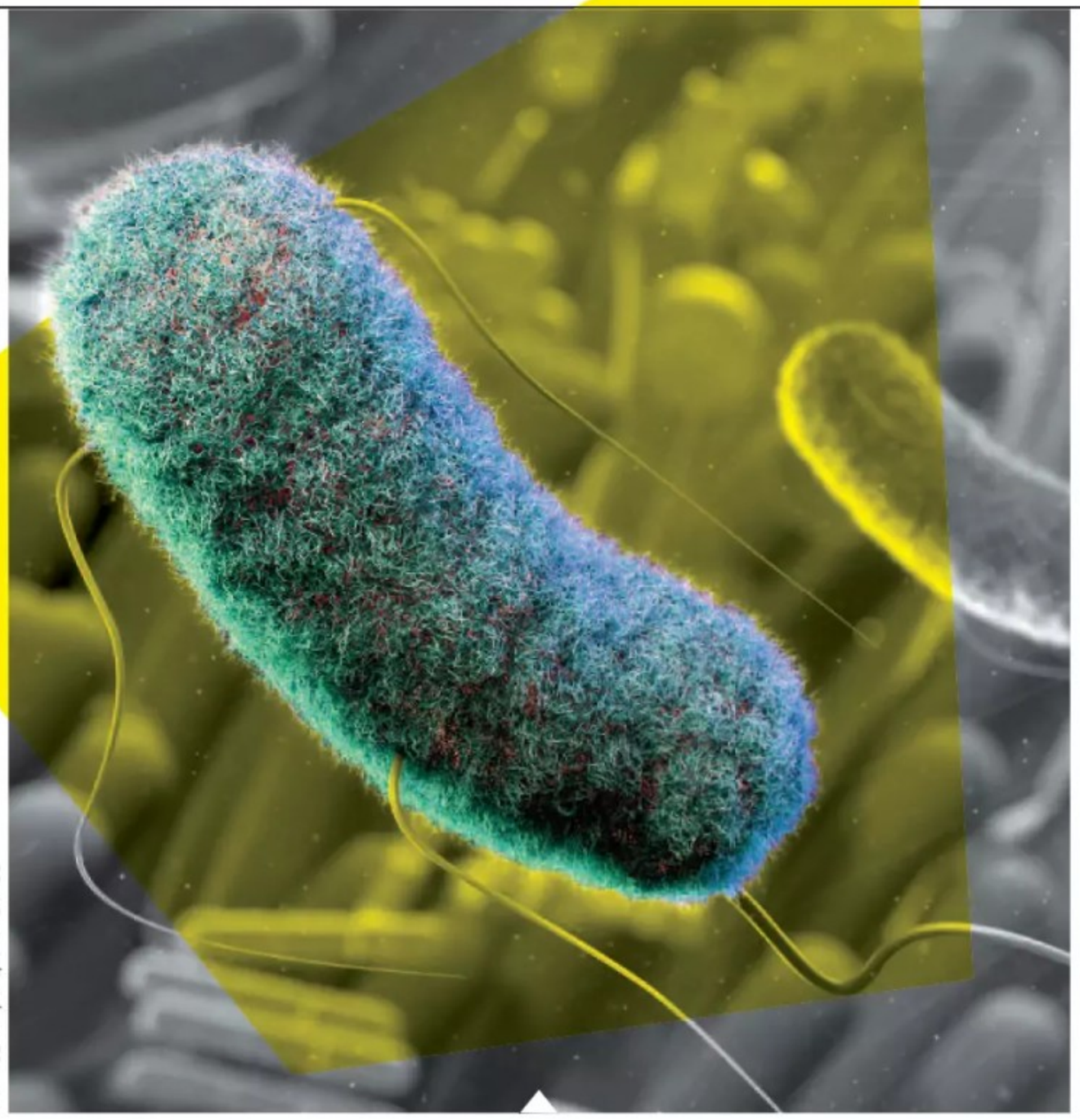
Si l'on considère que le système immunitaire est le mécanisme de défense mis en place par les cellules de notre corps pour réagir à l'agression d'un pathogène, il apparaît totalement logique que notre microbiote participe de ce système défensif. En effet, nous sommes constitués d'autant de cellules que nous hébergeons de bactéries, environ 30 000 milliards pour chacune de ces deux entités. Notre microbiote naît en même temps que nous, fruit du patrimoine bactérien maternel. Il va se développer et évoluer progressivement tout au long de notre existence en fonction de notre environnement, notre patrimoine génétique, notre hygiène et notre alimentation. Aujourd'hui, la recherche s'intéresse de plus en plus à cet écosystème unique, notamment dans ses relations avec notre santé. Car, on s'en aperçoit de plus en plus, bien traiter nos bactéries, c'est prendre soin de notre système immunitaire.

BRUNO LEVY/DIVERGENCE POUR SCIENCES ET AVENIR

« *On peut définir deux manières qu'a le microbiote d'agir sur notre immunité,* explique Nadine Cerf-Bensussan, responsable du laboratoire Immunité intestinale à l'institut Imagine, à Paris. *Indirectement, tout d'abord, par son effet barrière. En peuplant l'ensemble des niches métaboliques de l'intestin, il protège contre les bactéries pathogènes. En outre, plus directement, les bactéries et les métabolites qu'il produit ont un effet bénéfique direct pour le système immunitaire en activant certaines cellules luttant contre les infections. Ce faisant, il renforce la barrière intestinale, protège des allergies et favorise les réponses vaccinales.* »

Encore faut-il que la composition de notre microbiote soit favorable. Car quantité de facteurs sont à même de le perturber. Ceux-ci aggraveront d'autant un système immunitaire malmené, entraînant notre organisme dans un cercle vicieux qui favorise la sélection de bactéries résistantes très inflammatoires, et à terme peut conduire à des affections chroniques comme la maladie de Crohn ou la rectocolite hémorragique. Dès la naissance, s'instaure ainsi un dialogue permanent et dynamique entre notre microbiote bactérien et notre immunité, chacun ayant un effet sur l'autre. Quantité de facteurs génétiques mais également environnementaux sont en jeu. Des plus évidents — l'hygiène, la pollution, le tabac, le stress, etc. —jusqu'aux plus insoupçonnés, comme certains médicaments. Par exemple, les antibiotiques qui, en bouleversant la population bactérienne interne, auront *in fine* une répercussion sur la qualité de notre immunité. Si « *le microbiote est vraiment un miroir de notre environnement* », selon l'expression de Nadine Cerf-Bensussan, le facteur le plus important est sans doute notre alimentation. « *Les aliments ultratrans-*

> “ Le microbiote protège des allergies et favorise les réponses vaccinales ”
>
> **Nadine Cerf-Bensussan,** responsable du laboratoire Immunité intestinale à l'institut Imagine, à Paris, Grand Prix Inserm 2023



THOM LEACH/SPL/SUCRÉ SALÉ

Propre à chaque individu, le microbiote intestinal humain renferme quelque 30 000 milliards de bactéries (illustration).

THÉRAPEUTIQUE

Vers des probiotiques de nouvelle génération

Même si la transplantation fécale visant à implanter le microbiote sain d'un individu chez un malade souffrant d'un dérèglement immunitaire est efficace, la méthode a ses limites. Coût élevé, difficulté à trouver des donneurs, à les tester, la recherche s'oriente donc vers des thérapies plus simples. *« Nous travaillons depuis une vingtaine d'années sur des probiotiques nouvelle génération,* explique le Pr Harry Sokol de l'hôpital Saint-Antoine, à Paris. ***Nous avons identifié chez la bactérie*** Faecalibacterium prausnitzii ***des mécanismes d'action immunorégulateurs qui ont des effets dans l'inflammation intestinale. On a remarqué que moins cette bactérie était présente, plus les patients atteints de la maladie de Crohn avaient tendance à faire des poussées inflammatoires. »*** **Présente chez la quasi-totalité des êtres humains, cette bactérie constitue un sérieux espoir de médicament pour des malades, estime le scientifique.**

formés modernes utilisent par exemple beaucoup d'émulsifiants pour prolonger leur durée de conservation, décrit Benoît Chassaing, directeur de recherche Inserm et responsable de l'équipe Interactions microbiote-hôte à l'Institut Pasteur, à Paris. *Or, nous avons découvert que ces agents sont capables de bouleverser notre fragile équilibre bactérien et de conduire à des inflammations intestinales chroniques.* » Du reste, une étude de 2018 publiée dans la revue *Cell* a bien démontré que l'alimentation occidentale avait totalement appauvri le microbiote bactérien intestinal de populations ayant émigré aux États-Unis, conduisant à des problèmes métaboliques et immunitaires qui s'aggravaient au fil des générations. *« C'est pourquoi il est important de connaître le contenu du microbiote de populations qui ne sont pas uniquement européennes ou américaines, comme ce fut le cas pendant trop longtemps,* avance Benoît Chassaing. *Depuis quelques années, les scientifiques cartographient également des microbiotes africains comme ceux de tribus de chasseurs-cueilleurs, ce qui nous a permis de faire de nouvelles découvertes.* »

Corriger la flore bactérienne pour mieux répondre au traitement

Un bon microbiote ne protège pas uniquement contre les pathogènes. Il permet aussi à un organisme de répondre plus efficacement à un traitement. Ainsi, plus il est abondant et riche, plus un vaccin s'avérera efficace. Autre exemple : les traitements anticancéreux basés sur l'immunothérapie *(lire p. 67)*. Leur but est de réactiver chez le patient un système immunitaire qui se serait épuisé à lutter contre le cancer. Or, on s'est aperçu que cette approche fonctionnait très bien chez certains malades, mais pas chez d'autres. L'hypothèse est que le microbiote intestinal, de par la régulation du système immunitaire sous-jacent, joue un rôle essentiel dans la réussite du traitement. De sorte qu'il serait un jour possible de savoir, en analysant le patrimoine bactérien des patients, qui serait un bon répondeur à l'immunothérapie et qui le serait moins. Dans ce dernier cas, avant le traitement, le patient recevrait une transplantation fécale ou un traitement probiotique puissant *(lire l'encadré ci-dessus)* pour corriger sa flore bactérienne afin qu'il réponde mieux à l'immunothérapie. Et encore, nous ne parlons là que des seules bactéries. Mais notre microbiote est beaucoup plus vaste et constitué de bien d'autres micro-organismes : virus et champignons. *« Ces derniers ont également des effets sur le système immunitaire,* note le Pr Harry Sokol, gastro-entérologue à l'hôpital Saint-Antoine, à Paris, *et il existe des interactions entre champignons et bactéries. Concernant les virus bactériophages qui nous peuplent, ils modulent nos populations bactériennes mais nous n'en savons guère plus. Les outils d'étude sont beaucoup moins développés, le domaine étant très récent. À ce stade, tout reste à faire. »* ■ **H. R.**

VACCINS

Un allié de poids qui fait sa révolution

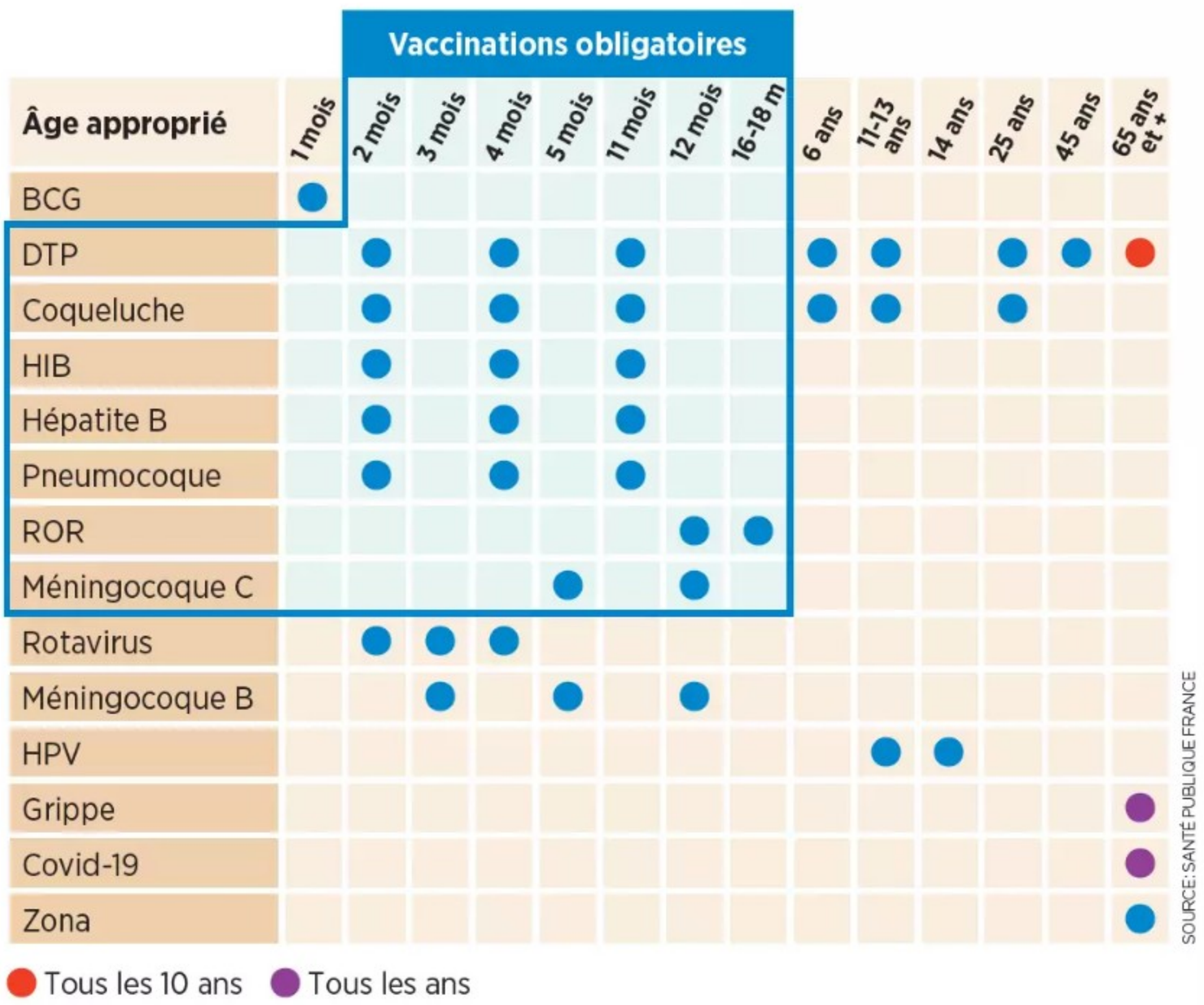
Le développement de vaccins à ARN messager a fourni une réponse rapide à la menace du Covid-19. Cette technologie ouvre la voie à des vaccins contre de nombreuses autres maladies, et même contre le cancer.

« *Après l'accès à l'eau propre, les vaccins sont l'intervention de santé publique la plus efficace pour éviter les infections, les hospitalisations et les décès*, lance Meru Sheel, épidémiologiste et experte en maladies infectieuses à l'université nationale d'Australie. *Ils protègent les individus, les communautés, et même les personnes qui ne peuvent pas se faire vacciner pour raisons médicales.* »

Selon une étude de l'Organisation mondiale de la santé, publiée en mai 2024 dans *The Lancet*, ils auraient sauvé plus de 150 millions de vies depuis le lancement en 1974 du programme mondial de vaccination des enfants contre un grand nombre de maladies (tétanos, polio, rougeole…). Désormais, les chances de survie d'un enfant de moins de 10 ans sont 40 % plus élevées qu'il y a cinquante ans.

Ce n'est que depuis le XVIIIe siècle que l'Occident dispose de cette arme redoutable dans sa bataille contre les microbes, grâce à une femme britannique, Mary Wortley Montagu. En 1721, alors qu'une épidémie de variole faisait rage au Royaume-Uni, elle fit inoculer à sa fille de 3 ans une petite quantité de pus tirée des pustules d'un malade, technique qu'elle avait observée lorsqu'elle habitait dans l'Empire ottoman. Sa fille devint ainsi la première personne immunisée contre la variole en Occident.

Le calendrier simplifié des vaccinations en France



SOURCE : SANTÉ PUBLIQUE FRANCE

Apprendre à reconnaître le microbe pour se défendre

En 1796, le médecin anglais Edward Jenner a rendu cette immunisation plus sûre, en utilisant le pus prélevé sur une femme infectée par la vaccine, un virus proche de celui de la variole qui affecte les vaches et qui cause moins d'effets secondaires chez l'humain. Près d'un siècle plus tard, Louis Pasteur perfectionna le procédé en prouvant qu'on peut encore atténuer l'effet d'un microbe en le cultivant et le laissant vieillir. Depuis, les approches pour concevoir des vaccins prophylactiques ont beaucoup évolué, mais leur principe est toujours le même : présenter au système immunitaire un échantillon (soit une petite quantité du microbe en entier, soit une partie) pour que notre corps apprenne à le reconnaître par la suite et à s'en défendre.

VOISIN/PHANIE

Depuis leur mise sur le marché fin 2020, près de 14 milliards de doses de vaccins anti-Covid à ARNm ont été administrées dans le monde.

Mais si le principe ne change pas, la nature du vaccin connaît une révolution inédite avec les vaccins à ARN messager (ARNm). Développés depuis le début des années 1990, ils ont été adaptés en 2020 au coronavirus Sras-CoV-2. Depuis, près de 14 milliards de doses de vaccins contre le Covid ont été administrées dans le monde, sauvant plus de 14 millions de vies en seulement une année, selon une étude publiée en septembre 2022 dans *The Lancet Infectious Diseases*.

La spécificité des vaccins à ARNm est de donner à l'organisme les instructions pour produire une partie du virus — pour le coronavirus, la protéine Spike qui forme sa couronne. Une approche qui présente plusieurs avantages. D'abord, une grande flexibilité de conception, car les molécules d'ARN peuvent être modifiées facilement et rapidement pour les adapter à des pathogènes en constante évolution (comme le Sras-CoV-2). Ensuite, cette rapidité de production permet de tester en peu de temps un grand nombre de molécules pour sélectionner les plus efficaces. Enfin, il est possible de combiner plusieurs molécules d'ARN pour cibler plusieurs pathogènes ou plusieurs souches d'un même pathogène.

Si les enquêtes de pharmacovigilance réalisées par l'Agence nationale de sécurité du médicament (Anses), après les plus de 150 millions de doses de vaccin anti-Covid administrées en France, ont confirmé la sûreté de ces vaccins, cette technique n'a pas toujours aussi bien fonctionné. *« L'ARN présente deux problèmes majeurs. Le premier est que c'est une molécule inflammatoire, car nous avons beaucoup de capteurs cellulaires qui détectent l'ARN pour déceler les infections,* explique Norbert Pardi, spécialiste des vaccins à ARNm à l'université de Pennsylvanie (États-Unis). *Le deuxième est qu'il est difficile de faire entrer ces molécules dans les cellules.* » Pour rendre ces vaccins sûrs, il a fallu modifier les briques qui forment l'ARN, les nucléotides, afin de diminuer cette détection immunitaire et réduire les effets secondaires (cette avancée a valu le prix Nobel de médecine à Katalin Karikó et Drew Weissman en 2023). Et pour faciliter leur livraison dans la cellule, l'ARN a été enveloppé dans des particules lipidiques. Une couverture qui, en plus de l'aider à pénétrer, le protège contre les enzymes qui le dégradent.

Une nouvelle génération à l'essai : les nanovaccins

Les scientifiques envisagent de très nombreux débouchés pour les vaccins à ARNm ainsi conçus. Certains sont à l'essai contre le virus de la grippe, Mpox, Ebola et le VIH. Les vaccins à ARNm représentent même un espoir dans la lutte contre le cancer avec une nouvelle génération, les nanovaccins. Ils reposent sur des nanoparticules qui jouent un rôle essentiel à plusieurs niveaux : *« Les vaccins à ARNm contre le cancer n'étaient pas très efficaces parce que les tumeurs ont des mécanismes pour inhiber la détection immunitaire, par exemple en diminuant la présentation des antigènes et en créant un environnement hostile pour les cellules immunitaires,* explique Hensin Tsao, dermatologue spécialisé dans les cancers de la peau à l'université Harvard (États-Unis). *Les nanotechnologies peuvent résoudre cela en augmentant la présentation des antigènes pour améliorer l'activation du système immunitaire contre le cancer et en modifiant le micro-environnement autour de la tumeur afin de diminuer la suppression immunitaire causée par le cancer. Et elle peut aussi protéger les vaccins de la dégradation, améliorant leur durée de vie et leur puissance.* »

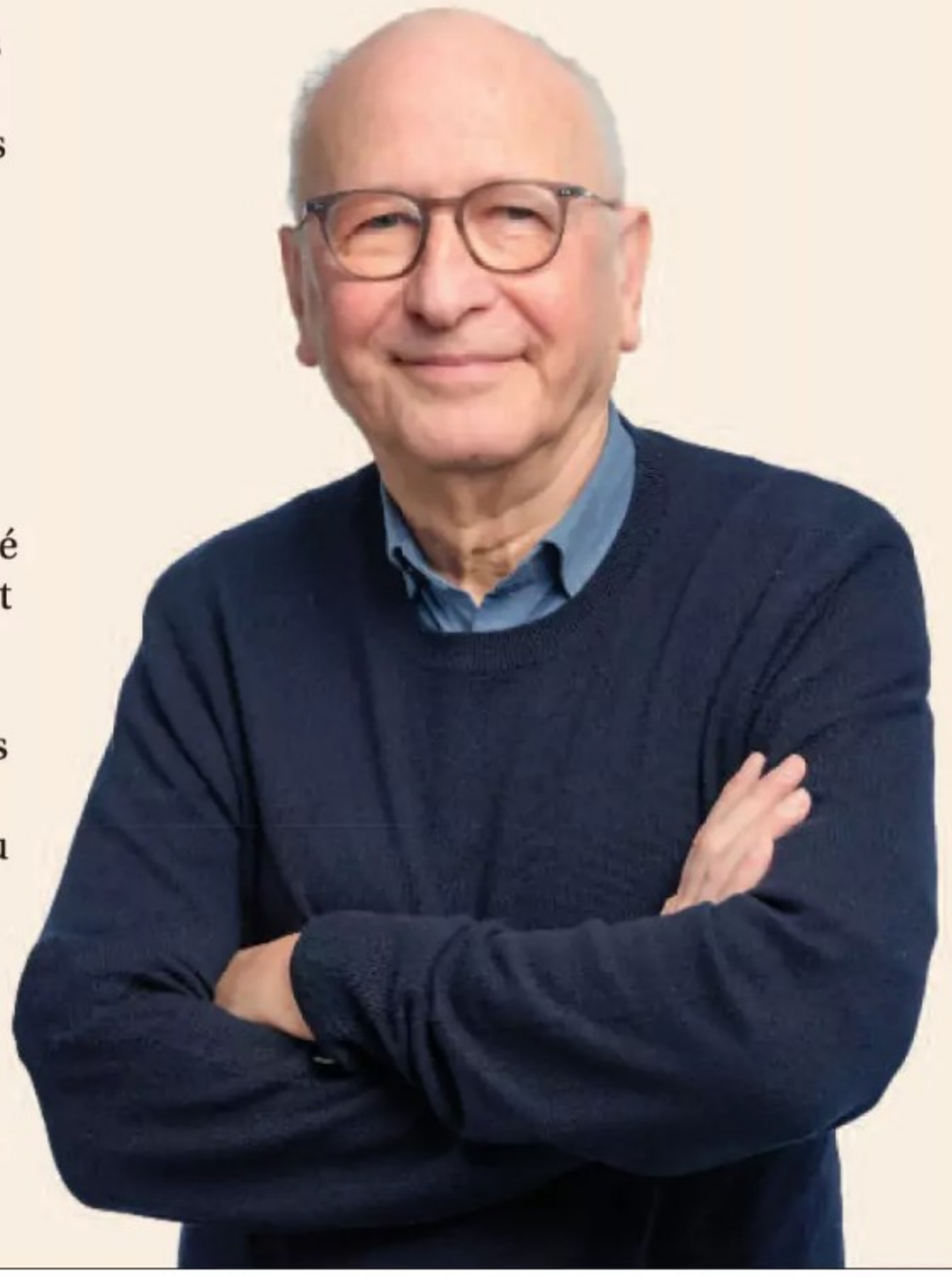
Les molécules d'ARN peuvent être modifiées facilement et rapidement pour les adapter à des pathogènes en constante évolution, comme le Sras-Cov-2

VERBATIM

ALAIN FISCHER IMMUNOLOGUE À L'HÔPITAL NECKER-ENFANTS MALADES (PARIS) ET PROFESSEUR ÉMÉRITE AU COLLÈGE DE FRANCE

« La vaccination des personnes âgées reste très insuffisante »

“Les enquêtes d'opinion montrent que la grande majorité des Français sont favorables à la vaccination. Aujourd'hui, il y a même davantage de Français favorables à la vaccination qu'il y en avait il y a vingt ans. Mais il reste une frange de gens qui sont hésitants ou carrément hostiles. Les personnes réticentes face aux vaccins le sont devenues encore plus après la pandémie de Covid-19. Mais le plus important est que ce groupe-là est quantitativement moins fort qu'il ne l'était dans le passé. Ceux qui étaient hésitants se sont progressivement laissé convaincre de l'intérêt de la vaccination, contrairement à un noyau dur qui est plus dans l'hostilité.
En France, on a résolu à peu près le problème de la vaccination des nourrissons avec la vaccination obligatoire, à laquelle les parents ont adhéré. En revanche, il y a un domaine où la vaccination est très insuffisante : c'est la vaccination des personnes âgées. Toute une série de vaccins sont vraiment utiles, voire indispensables. Mais il existe un défaut d'information, parce que les professionnels de santé eux-mêmes n'ont pas, pour l'instant, apporté une grande attention à cette question. Il faut que cela change.
La population suit les conseils des professionnels de santé, les médecins, les pharmaciens, etc. Donc, il faut d'abord une sensibilisation du corps médical à l'importance de la vaccination des personnes âgées.
Et aussi celle des personnes malades et des femmes enceintes.”

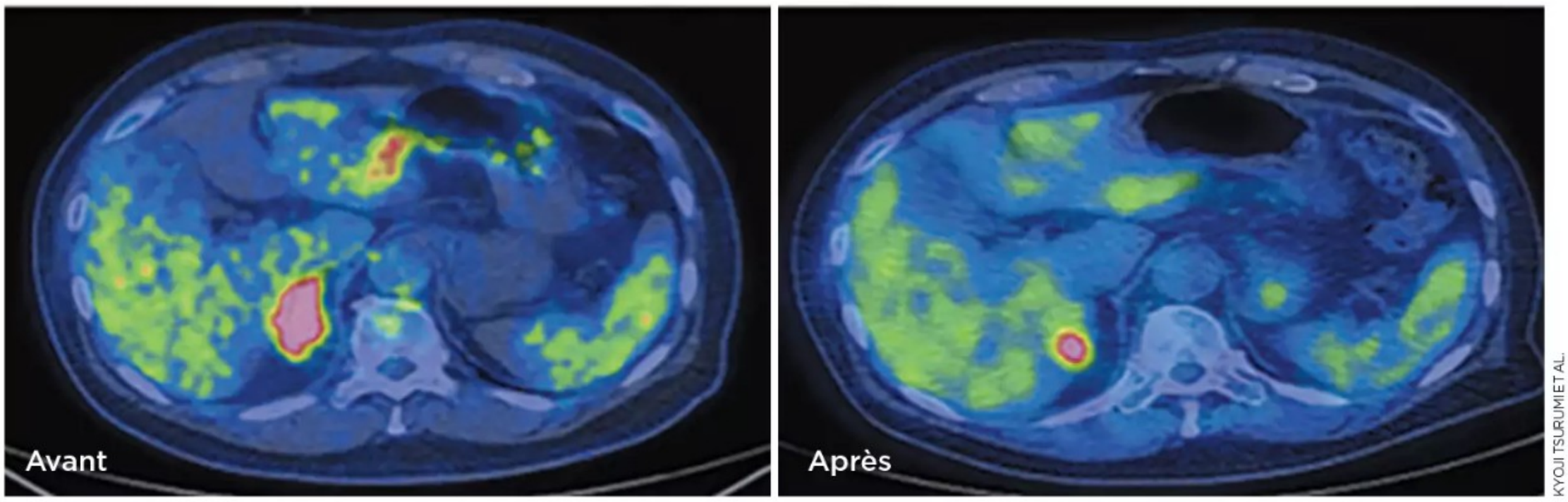


BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

- Ces vaccins à ARNm pourraient devenir plus efficaces grâce une nouvelle avancée. Jusqu'à présent, le nombre de protéines du pathogène produites par la vaccination dépendait de la dose d'ARNm injectée. Pour une réponse suffisamment forte, il fallait que la quantité d'ARN soit assez élevée, augmentant le risque d'effets secondaires. Désormais, les molécules d'ARN peuvent se multiplier une fois à l'intérieur du corps, avec des vaccins auto-amplifiants qui comportent aussi les instructions pour produire des protéines qui répliquent l'ARN. Cela permet d'injecter une dose moindre du vaccin, diminuant les effets secondaires tout en générant une réponse immunitaire suffisante. Un premier vaccin contre le Covid-19 utilisant cette méthode a été validé en 2023 au Japon.

Vers des formules personnalisées

La prochaine étape pour rendre les vaccins plus efficients et plus sûrs sera de les personnaliser en fonction de chaque individu. Par exemple, certaines mutations génétiques peuvent modifier le système immunitaire et donc la réponse générée par un vaccin, comme c'est le cas pour des mutations dans les gènes HLA (codant des protéines régulatrices du système immunitaire) qui diminuent l'efficacité du vaccin contre l'hépatite B. Le microbiote de chaque individu peut aussi avoir une influence sur l'immunisation. Ainsi, l'utilisation d'antibiotiques peut diminuer l'efficacité du vaccin contre la grippe. Certains médicaments peuvent également interférer avec les vaccins.
Mais le plus important pour les rendre efficaces sera de… continuer à les administrer. *« Actuellement, il y a plusieurs épidémies de rougeole, notamment aux États-Unis, maladie pour laquelle nous avons un vaccin très efficace,* se désole Meru Sheel. *Quand la confiance du public baisse, il est important que les autorités de santé reconstruisent cette confiance.* » Pas sûr que ça sera le cas sous l'administration Trump. ■ **N. G. C.**



KYOJI TSURUMI ET AL.

Une diminution significative de la taille d'une tumeur pulmonaire et métastatique (en rose) est visible sur l'imagerie après 21 semaines de traitement à l'anticorps pembrolizumab.

CANCER

Les nouvelles armes de l'immunothérapie

Cette technique consiste à réactiver la capacité du système immunitaire à reconnaître et à éliminer les tumeurs. Depuis 2015, l'utilisation de nouveaux anticorps s'est étendue à de nombreux cancers différents. Avec des résultats prometteurs.

En 2015, la surprenante guérison de l'ancien président des États-Unis et prix Nobel de la paix Jimmy Carter d'un mélanome avancé a révélé au grand jour l'existence d'une nouvelle arme contre des cancers jusque-là incurables. Trois mois après les injections d'un nouvel anticorps, le pembrolizumab, les métastases de ce cancer de la peau disséminées jusque dans son cerveau avaient disparu. L'ancien président, guéri, put même arrêter tous ses traitements. Alors que ses médecins ne lui donnaient que quelques mois à vivre — la chimiothérapie et la radiothérapie étant inefficaces contre la maladie à ce stade —, l'ancien président est finalement décédé centenaire fin 2024 !

L'immunothérapie consiste à réactiver la capacité de notre système immunitaire à reconnaître et à éliminer les tumeurs. Elle repose notamment sur des anticorps qui redonnent la main aux cellules immunitaires quand elles sont inactivées par les cellules cancéreuses. Souvent, celles-ci utilisent en effet des molécules particulières, appelées points de contrôle immunitaire, qui les font passer pour des cellules amies. Des « faux papiers » en quelque sorte, qui trompent le système, de sorte que l'organisme ne cherche même pas à s'attaquer à la tumeur. Les anticorps de type bloqueur de points de contrôle immunitaire (BPCI) permettent d'inactiver ces molécules et de démasquer ainsi les fraudeuses au radar du système immunitaire. C'est ce qui a permis à l'époque la surprenante guérison de Jimmy Carter. Et c'est ainsi que, depuis 2015, l'utilisation de ces BPCI s'est étendue à des ▸

dizaines de cancers différents. En 2022, plus de 74 000 patients en avaient déjà bénéficié en France, pour traiter plus de 17 types de cancers, contre 36 000 en 2019.

Chimiothérapie ou chirurgie peuvent être évitées

« Nous avons une guérison dans environ 20 % des cas, mais ce genre de succès reste très difficile à prédire », regrette Nicolas Girard, oncologue de l'Institut Curie à Paris. Il dépend à la fois du type de cancer, de l'organisme, et peut-être même du microbiote intestinal du patient. Paradoxalement, les meilleurs résultats sont obtenus avec des cancers très résistants aux traitements classiques, en raison notamment de leurs nombreuses mutations. C'est le cas des mélanomes à un stade avancé, ou des cancers colorectaux génétiquement instables, un type minoritaire mais peu sensible aux traitements classiques. Ces tumeurs présentent de nombreuses modifications à leur surface qui les rendent très visibles au système immunitaire, pour peu que leurs « faux papiers » soient neutralisés par les BPCI. Pour la première fois, la chimiothérapie est parfois évitée et le traitement arrêté au bout de quelques mois ou années. Pour d'autres types de cancers avancés auparavant incurables, c'est même la chirurgie qui peut être évitée. Contre les tumeurs pulmonaires, des anticorps comme le pembrolizumab obtiennent parfois des résultats spectaculaires : *« Chez 25 % des patients atteints du cancer du poumon majoritaire* [dit non à petites cellules]*, nous voyons les tumeurs disparaître au bout de trois injections d'immunothérapie, au point que se pose parfois même la question d'opérer »*, témoigne, étonné, Nicolas Girard.

Nombre d'essais cliniques tentent aujourd'hui de reproduire ces bons résultats sur d'autres cancers tels ceux de l'œsophage, de l'endomètre (muqueuse interne de l'utérus), de l'estomac ou du pancréas. C'est au moins le cas lorsque ces derniers présentent aussi des formes d'instabilité génétique décelables par l'anatomopathologie, un examen de microscopie mené sur des échantillons tumoraux. Et même lorsque les cellules cancéreuses se distinguent au contraire par une seule mutation particulière, les BPCI peuvent encore réserver de bonnes surprises, notamment contre certains cancers du sein ou du poumon. *« Si nous avons déjà un anticorps capable de reconnaître ces cellules, il les désignera au système immunitaire débloqué par l'injection d'un BPCI »*, indique Nicolas Girard.

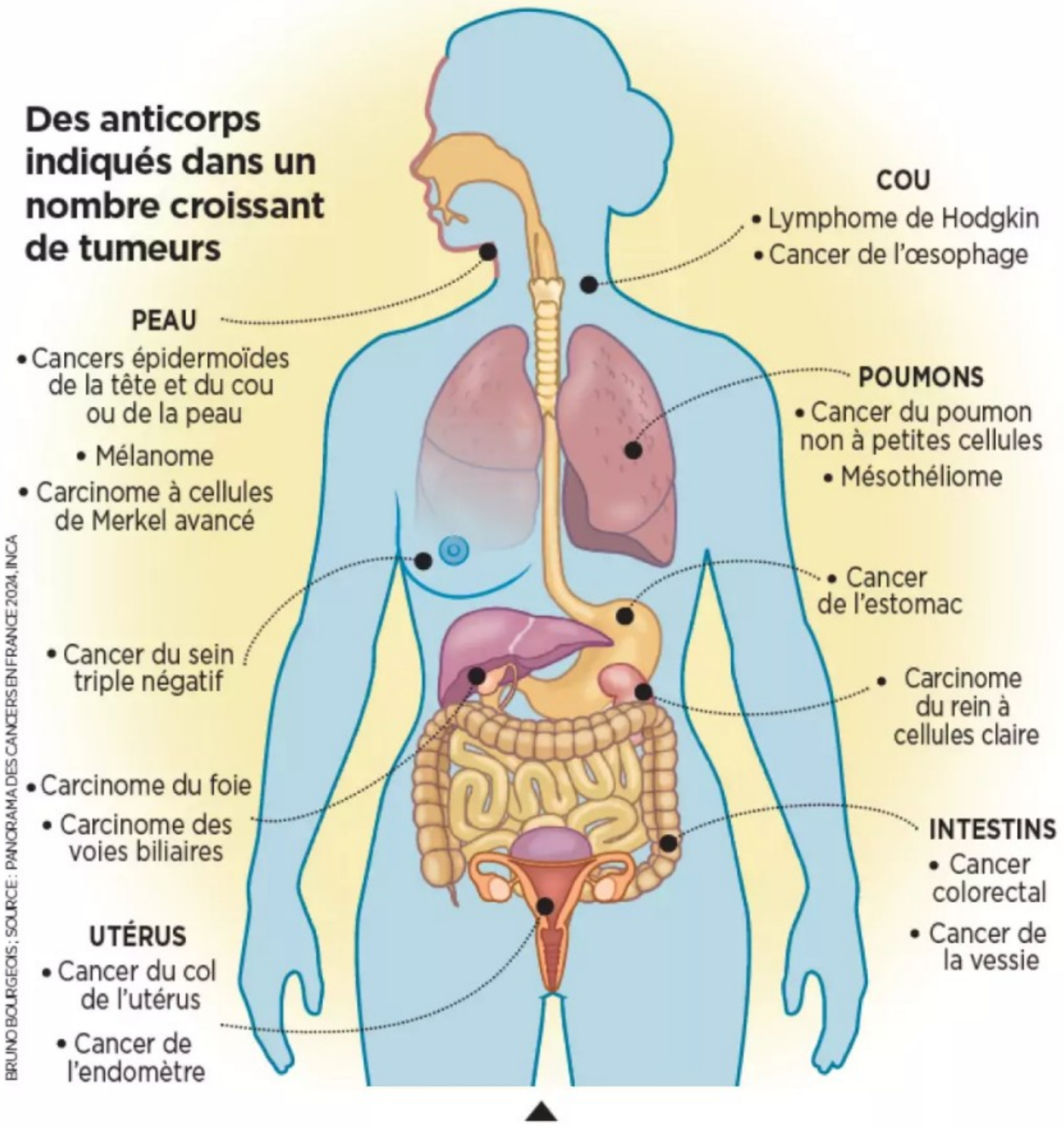
Une forte réduction des risques de rechute

Comme l'a montré l'exemple du président Jimmy Carter, l'autre avantage majeur de cette stratégie est la forte réduction des risques de rechute du cancer. En effet, les cliniciens se sont aperçus que le système immunitaire, une fois réactivé contre les cellules cancéreuses, acquiert une mémoire antitumorale : *« Pour la première fois, nous avons observé un effet vaccinal dans un traitement anticancéreux où le système immunitaire, remobilisé, apprend aussi à reconnaître les cellules à éliminer »*, souligne Nicolas Girard. Avec cette propriété, l'immunothérapie par BPCI offre également un précieux renfort

THÉRAPEUTIQUES

Un changement de paradigme dans la lutte contre les cancers

La médecine du cancer a débuté au XIXe siècle avec la chirurgie pour retirer les tumeurs, s'est poursuivie par l'utilisation des rayons X ou gamma de la radioactivité pour les détruire *in situ* puis, à partir de la seconde moitié du XXe siècle, au moyen de diverses chimiothérapies, où des produits chimiques toxiques sont injectés aux malades pour tuer les cellules cancéreuses. Ces thérapies ont gagné en précision avec l'injection d'anticorps qui reconnaissent spécifiquement les cellules cancéreuses et orientent l'action du système immunitaire. Des tentatives qui permettent de prolonger et parfois de sauver la vie des patients, mais qui se heurtent à un obstacle majeur : l'extraordinaire capacité des cellules cancéreuses à se défendre par une foule de moyens différents. Elles peuvent par exemple se dissimuler pour passer inaperçues devant les patrouilles des lymphocytes T cytotoxiques, des cellules normalement capables de les reconnaître et de les éliminer. Dans les années 1990 et 2000, des chercheurs s'aperçoivent que les cellules cancéreuses peuvent aussi désamorcer directement l'attaque des lymphocytes T. Elles enclenchent pour cela des récepteurs à la surface des cellules immunitaires, les points de contrôle immunitaires. Le blocage de deux de ces récepteurs, les protéines CTLA-4 et PD-1, par l'injection d'anticorps peut libérer les cellules immunitaires. Leur découverte a valu en 2018 le prix Nobel de médecine à l'Américain James P. Allison et au Japonais Tasuku Honjo.



En 2022, plus de 74 000 patients en France ont bénéficié d'anticorps bloqueurs de points de contrôle immunitaire (BPCI) pour traiter plus de 17 types de cancers, contre 36 000 en 2019.

une fois ajoutée aux traitements classiques. *« L'injection d'un BPCI avant ou après les traitements classiques va relancer le système immunitaire face à des cellules cancéreuses déjà bien abîmées, ce qui facilitera le développement d'une bonne mémoire immunitaire et réduira les risques de rechute par la suite »*, précise l'oncologue. L'espoir d'une guérison, autrefois bien fragile après avoir eu un cancer, peut devenir réalité. *« Aujourd'hui, nous sommes à deux malades sur trois qui sont guéris, contre 50 % dans les années 1990 »*, rappelait le Pr Fabrice Barlesi, directeur de l'institut Gustave-Roussy (Villejuif), à l'occasion de la dernière Journée mondiale du cancer. Une proportion qui pourrait atteindre les 80 % d'ici à 2040, selon le spécialiste. Toutes les guérisons ne sont pas dues qu'aux BPCI bien sûr, mais leur champ d'application s'est considérablement élargi, et de plus en plus d'essais cliniques les associent à la chirurgie et aux traitements de chimiothérapie ou de radiothérapie.

Ultime atout de cette approche, les effets indésirables restent limités en comparaison avec ceux des traitements classiques : *« Dans la plupart des cas, nous avons peu de problèmes sévères,* note Nicolas Girard. *Ce que nous voyons le plus souvent, ce sont des thyroïdites que l'on peut traiter. »* Il existe aussi de rares cas d'hyperprogression, où le cancer redouble de vigueur après le traitement, et d'autres, encore plus rares, de myocardite fatale… Une surveillance médicale rapprochée reste ainsi nécessaire après les injections.

D'autres points de contrôle immunitaire pourraient être visés

Ces résultats très encourageants ne cessent d'élargir l'horizon thérapeutique offert par les BPCI, alors qu'ils ont été introduits il y a moins de quinze ans. Le nombre d'indications pour le pembrolizumab est passé d'une pour le mélanome en 2014 à des dizaines pour des cancers très variés. D'ailleurs, en 2024, cet anticorps a une nouvelle fois été le médicament le plus lucratif au monde, rapportant près de 30 milliards de dollars au laboratoire pharmaceutique américain Merck. À ses côtés, une dizaine d'autres anticorps à l'action similaire sont désormais autorisés aux États-Unis et en France. À quoi s'ajoutent des combinaisons parfois très efficaces de deux BPCI complémentaires. Enfin, d'autres points de contrôle immunitaire pourraient être visés pour débloquer l'action des cellules du système immunitaire. *« Actuellement, trois sont ciblés par des produits déjà sur le marché français, mais on en connaît 24 autres qui font l'objet d'intenses recherches »*, relève Nicolas Girard. L'offensive de l'immunothérapie par BPCI contre le cancer ne fait que commencer. ■ **P. K.**

F. BELONCLE - INSTITUT CURIE

« Pour la première fois, nous avons observé un effet vaccinal dans un traitement anticancéreux »

Pr Nicolas Girard, pneumologue, spécialisé en oncologie thoracique à l'Institut Curie, à Paris

Les prouesses de la psychiatrie de précision

De nouveaux programmes de recherche sur la dépression ou la schizophrénie notamment visent à établir un diagnostic fondé sur des connaissances objectives et mesurables, et non plus seulement l'observation de manifestations subjectives. Des avancées rendues possibles par les progrès de l'imagerie cérébrale et la biologie moléculaire.

Le temps où l'enfermement dans des asiles était la seule réponse aux troubles psychiatriques est loin. Pourtant, malgré les progrès conjugués ces cinquante dernières années de la psychothérapie et de la pharmacologie avec l'avènement des neuroleptiques, *« 60 % des patients touchés par une affection psychiatrique ne répondent toujours pas de manière suffisante à leur traitement »*, rappelle la professeure Marion Leboyer, Grand Prix Inserm 2021 et directrice de la fondation FondaMental. C'est pour relever ce défi médical qu'est apparu ces dernières années le concept de psychiatrie de précision, dont l'objectif est d'asseoir les pratiques sur des connaissances objectives et mesurables. De fait, aujourd'hui, à la différence d'autres spécialités comme l'oncologie ou la cardiologie, le diagnostic psychiatrique repose exclusivement sur l'observation de manifestations subjectives ou de récits (tristesse, anxiété, hallucinations, repli sur soi, hypo- ou hypersomnie, etc.) et n'a recours à aucun biomarqueur pour orienter le traitement qui demeure généraliste, probabiliste et non ciblé. Forte des avancées en imagerie cérébrale, biologie moléculaire et intelligence artificielle, la psychiatrie de précision vise ainsi à *« définir des tableaux cliniques et biologiques spécifiques, pour proposer des traitements ciblés sur les causes et les mécanismes qui sous-tendent ces maladies »*, précise encore Marion Leboyer. C'est dans cette optique que débute cette année le programme de recherche Propsy sous la houlette de l'Inserm et du CNRS et sous la direction scientifique de Marion Leboyer. Doté de 80 millions d'euros sur sept ans, il s'appuiera sur une cohorte de 10 000 patients et de 500 individus témoins pour explorer les nombreux facteurs (génétiques, épigénétiques, environnementaux, etc.) impliqués dans la dépression, les troubles bipolaires, la schizophrénie ou encore l'autisme sans retard intellectuel. En tout, 13 projets de recherche ciblés seront ainsi menés dans toute la France. Parmi eux,

Selon les chercheurs de l'université Stanford (États-Unis), il existe au moins six sous-types de dépression, impliquant des circuits neuronaux distincts mis en évidence grâce à l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf). ◀

LIPO CHING

le suivi et le traitement en temps réel des hallucinations schizophréniques dans le cerveau des patients grâce à l'imagerie (*lire l'encadré p. 72*), ou encore une caractérisation affinée de la dépression afin d'être en mesure de proposer des traitements ciblés.

Un premier traitement ciblé de la dépression résistante

La dépression recouvre en effet des symptômes hétérogènes liés à des dysfonctionnements cérébraux divers, comme l'ont montré les travaux pionniers du centre consacré à la santé mentale de précision de l'université Stanford (États-Unis). Publiés en 2024 dans *Nature Medicine*, ils se sont appuyés sur l'IRMf pour observer et quantifier l'activité de six grands circuits cérébraux impliqués dans la régulation des pensées et des émotions chez 801 patients et 137 sujets témoins. Les mesures, effectuées au repos et dans le cadre de la réalisation de tâches (tâches cognitives ou tâches de reconnaissance d'émotions faciales, etc.), ont mis en évidence six sous-types de dépression. Chacun de ces biotypes était associé à des symptômes propres : par exemple, le biotype avec hyperactivité au repos se manifeste notamment par des ruminations, et le biotype cognitif est associé à des troubles de la mémoire, de l'attention et des fonctions exécutives.

Dans un second temps, l'équipe de Stanford est parvenue à déterminer le meilleur traitement pour chacun de ces biotypes parmi différentes options (trois antidépresseurs distincts ou une thérapie cognitivo-comportementale) : les résultats se sont traduits chez les patients par une réduction des symptômes corrélée à une modification de l'activité et de la connectivité, mesurée à l'IRM.

C'est aussi de l'université Stanford qu'a émergé le premier traitement ciblé de la dépression résistante aux traitements. Fondé sur la stimulation magnétique transcrânienne (SMT), une technologie mini-invasive capable de modifier l'activité électrique du cerveau, le ▶

SCHIZOPHRÉNIE

L'IRM pour apprendre à contrôler les hallucinations

Détecter automatiquement la survenue d'une hallucination dans le cerveau d'un patient schizophrène, c'est aujourd'hui possible grâce à l'IRM cérébrale. Au CHU de Lille, l'équipe du professeur Renaud Jardri, responsable du Centre de référence des maladies rares à expression psychiatrique, est l'une des rares au monde à savoir le faire. Cette expertise s'appuie sur des travaux qu'elle mène depuis des années en collaboration avec le service de neuroradiologie du professeur Jean-Pierre Pruvo, doté d'une IRM réservée à la recherche. Pour ce faire, ils ont recours à l'IRM fonctionnelle (IRMf), qui permet de suivre l'activité cérébrale en direct. *« Grâce aux données de capture hallucinatoire accumulées depuis de nombreuses années, nous avons pu entraîner des algorithmes d'apprentissage qui nous permettent de détecter un épisode hallucinatoire en temps réel, sans participation active du sujet, avec une précision de 80 à 90 % »*, explique Renaud Jardri. Publiés dans la revue *Biological Psychiatry* en 2022, les travaux de l'équipe lilloise ont marqué un tournant dans la compréhension des mécanismes sous-jacents des hallucinations. Et ouvert la voie au développement d'une stratégie de *neurofeedback* visant à apprendre au patient à réfréner lui-même ses hallucinations. Elle sera l'objet de l'étude Unrehal du programme Propsy, qui recrutera, dès l'été 2025, 90 patients souffrant d'hallucinations résistantes pour tester ses bénéfices. Concrètement, elle permet au patient de suivre ce qui se passe dans son cerveau lorsqu'il lutte contre les hallucinations, un peu comme dans un jeu vidéo. Placé dans l'IRM avec un petit miroir sur le ventre lui permettant de voir les informations projetées sur un écran, le patient a pour mission de mettre en œuvre une stratégie apprise pour repousser les hallucinations : des chuchotements pour entrer en concurrence avec une hallucination auditive ; ou de la méditation de pleine conscience pour faire diversion. Ses efforts sont retranscrits visuellement sous la forme d'un point qui, peu à peu, s'étend si la stratégie fonctionne, jusqu'à former un disque lorsque l'hallucination est vaincue.

▸ protocole Saint (Stanford Accelerated Intelligent Neuromodulation Therapy), propose une approche guidée par l'IRM qui consiste à délivrer durant cinq jours consécutifs un certain type d'ondes en des points adaptés aux caractéristiques du cerveau de chaque patient. Il permet d'obtenir une amélioration des symptômes dans neuf cas sur dix. *« L'un des avantages des méthodes de SMT est que l'on peut avoir des résultats très rapides, entre cinq et huit jours, ce qui n'est pas du tout le cas des antidépresseurs qui vont mettre jusqu'à six semaines à agir »*, note le psychiatre Charles Laidi, chef de clinique assistant à l'hôpital Henri-Mondor, à Créteil. Avec un effet persistant chez plus de la moitié des patients un mois après le traitement, le protocole Saint offre un nouvel espoir à des personnes initialement en échec thérapeutique. D'où son approbation par l'agence sanitaire américaine (FDA). En France, les CHU de Nantes et Besançon évalueront un protocole similaire dans le cadre d'une des études de Propsy. Avec pour objectif de caractériser les biomarqueurs associés à la réponse au traitement, en tenant compte du profil inflammatoire initial des patients.

Car le rôle de l'inflammation est un autre axe de recherche majeur pour la psychiatrie de précision. Des études ont en effet mis en lumière l'origine inflammatoire

F. GUENET / DIVERGENCE

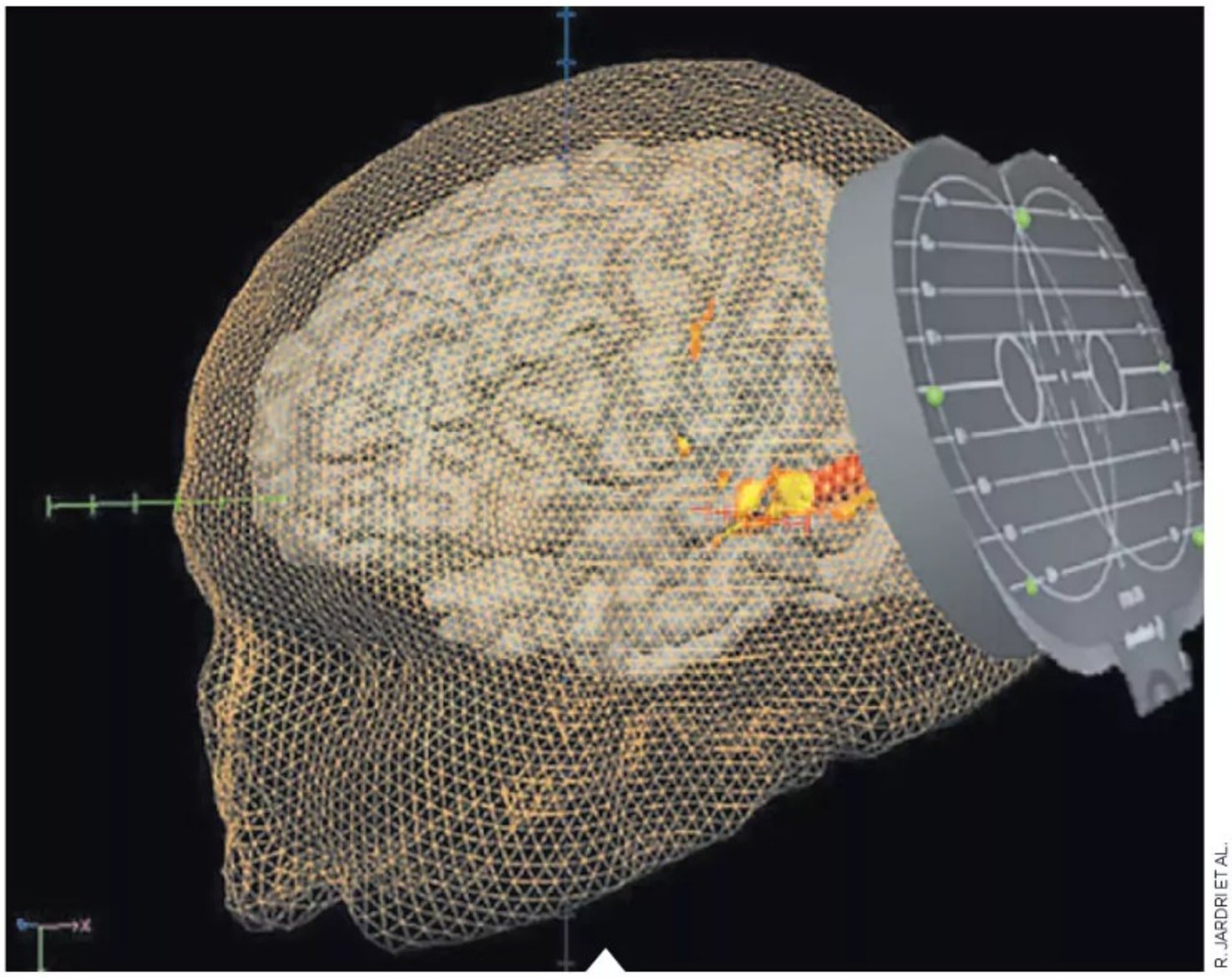
« Dans les maladies mentales, 40 % des patients, quelle que soit leur pathologie, ont une inflammation chronique »

Marion Leboyer, professeure de psychiatrie, directrice de la fondation FondaMental

de certaines pathologies, soulignant combien ces maladies qui affectent le fonctionnement cérébral ne sauraient être totalement dissociées de la santé du reste du corps. *« Dans les maladies mentales, 40 % des patients, quelle que soit leur pathologie, ont une inflammation chronique »*, précise ainsi Marion Leboyer. Une inflammation qu'il est possible de mesurer dans le sang, en dosant par exemple les protéines messagères de la réponse inflammatoire.

Les interventions sur l'hygiène de vie, un levier efficace

L'inflammation mesurée à l'aide de ces marqueurs est parfois associée à des troubles métaboliques, comme l'a montré la psychiatre néerlandaise Brenda Penninx : près d'un patient dépressif sur trois présenterait ce que la chercheuse nomme *« un profil de dépression immunométabolique »*. Cette dépression aux symptômes atypiques — elle augmente l'appétit, le poids et le sommeil, quand la dépression typique tend à les réduire — est liée non seulement à l'augmentation des marqueurs de l'inflammation, mais aussi à des anomalies métaboliques comme l'excès de cholestérol, la résistance à l'insuline et l'augmentation du tour de taille (syndrome métabolique). Chez les patients concernés, les traitements classiques ciblant l'inflammation (anti-inflammatoires, antibiotiques, immunomodulateurs) ont montré qu'ils pouvaient apporter des bénéfices, en complément des antidépresseurs. Et les interventions sur l'hygiène de vie s'avèrent particulièrement efficaces : ainsi, une étude conduite sur 16 semaines par Brenda Penninx, publiée en 2023 dans le *Journal of Affective disorders*, a montré que la course pratiquée deux fois par semaine réduisait les symptômes dépressifs et l'anxiété dans des proportions comparables aux antidépresseurs, tout en améliorant les marqueurs immunométaboliques (comme le poids, le tour de taille) quand les antidépresseurs les dégradaient (augmentation du cholestérol, des triglycérides et de la CRP). Un avantage majeur, les maladies cardiovasculaires étant la première cause de décès des personnes qui souffrent de troubles psychiatriques. Parfois, l'inflammation est même directement responsable de la maladie psychiatrique : c'est le cas de la psychose auto-immune, provoquée par le développement d'auto-anticorps dirigés contre les récepteurs du cerveau. *« On estime que 10 à 20 % des patients atteints de troubles psychotiques ou de troubles bipolaires pourraient être atteints par une psychose auto-immune »*, souligne Marion Leboyer.



R. JARDRI ET AL.

La stimulation magnétique transcrânienne peut être guidée par une IRM fonctionnelle : elle montre ici l'activation du cortex auditif d'un enfant lors d'une hallucination.

Une immunothérapie pour réduire les symptômes

Chez ces patients qui ne répondent pas aux traitements classiques, la prescription d'une immunothérapie permettrait de réduire la fabrication de ces auto-anticorps et donc les symptômes. C'est l'hypothèse testée dans Le projet Timdepist (Thérapeutique immuno-modulatrice après dépistage spécifique devant des troubles psychiatriques) porté par la fondation FondaMental en partenariat avec le CNRS et neuf centres hospitaliers en France.

Au-delà des stratégies thérapeutiques déployées pour lutter contre l'inflammation chronique et ses effets sur la santé mentale, les recherches visent à mieux comprendre ce qui déclenche et entretient le phénomène inflammatoire délétère. Infections, traumatismes sévères durant l'enfance, pollution, alimentation, prise de stupéfiants, etc., les facteurs environnementaux identifiés sont nombreux et nécessitent d'être affinés. C'est l'un des objectifs du programme Propsy, qui permettra de croiser données environnementales et données génétiques, en utilisant l'intelligence artificielle afin de comprendre pourquoi, à environnement égal, certains individus sont plus sujets à développer un trouble psychique que d'autres. Des informations essentielles pour permettre, à terme, de mieux soigner, mais aussi de mieux prévenir les troubles mentaux. ■ **Véronique Cluzel**

Manger cru, bonne ou mauvaise idée ?

Augmenter la part d'aliments crus dans son assiette peut être bénéfique pour la santé, à condition de respecter certaines précautions.

Carpaccios, sushis, jus de légumes… Depuis quelques années, la tendance est au cru ! Encore appelé « **crudivorisme** des temps modernes », la *raw food* (*raw* signifiant « cru » mais aussi « brut » en anglais) accorde ainsi toute la place aux aliments crus ou très peu cuits, aux produits bruts, et dans une moindre mesure, aux aliments d'origine animale (œufs, produits laitiers au lait cru, viandes et poisson) consommés sous forme de tartare, ceviche, sushis.

Manger cru préserve les vitamines

Consommer des végétaux crus permet de conserver intact l'ensemble de leurs nutriments, en particulier les vitamines sensibles à la chaleur (vitamines C, A, E et celles du groupe B). Lorsqu'elle est utilisée, la cuisson ne doit ainsi pas excéder une température de 42 °C. D'autres modes de préparation peuvent être privilégiés comme la germination des légumes secs (lentilles, pois chiches, etc.) et des céréales (millet, orge, etc.) qui facilite l'assimilation des minéraux et des vitamines par l'organisme. Une pousse de blé germée de cinq jours fournit ainsi cinq fois plus de vitamine C que le grain. Les graines germées sont aussi riches en antioxydants. Les pousses de chou rouge contiennent ainsi plus de bêtacarotène que les carottes crues (11,5 mg/100 g contre 8,3 mg/100 g) (1). Toutefois, ce régime alimentaire peut conduire à des carences notamment en vitamine B12, en l'absence de consommation de produits d'origine animale. Son application stricte, comme pour tout autre régime alimentaire, doit donc être encadrée par un médecin.

16,3 mg

La quantité de vitamine C contenue dans 100 g de tomate crue, contre 14,9 mg pour une tomate cuite.

(SOURCE : CIQUAL.)

Prudence avec les fibres

Consommer des produits crus riches en fibres en les mastiquant plus longuement contribue à augmenter le sentiment de satiété. Mais, si les fibres améliorent le transit intestinal et contribuent à la bonne santé du microbiote intestinal, elles peuvent parfois aussi irriter la paroi de l'intestin et engendrer divers troubles (douleurs, ballonnements, diarrhée, etc.) alors qu'elles sont plus digestes une fois cuites. En cas de syndrome du côlon irritable, l'augmentation de la part quotidienne en végétaux crus doit donc être progressive ou limitée.

Par ailleurs certains aliments consommés crus peuvent aussi être allergisants, comme les protéines (ovomucoïde, ovalbumine) du blanc d'œuf, à l'origine de réactions cutanées (eczéma, urticaire), digestives ou respiratoires.

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR

CRUDIVORISME Pratique alimentaire appelée également « alimentation vivante », qui consiste à se nourrir exclusivement d'aliments crus.

ACRYLAMIDE Substance chimique qui se forme naturellement à partir des sucres et des acides aminés (principalement l'asparagine) dans les aliments riches en amidon au cours des processus de cuisson à haute température. Elle est présente dans des produits comme les pommes de terre frites, le pain, les biscuits ou le café.

TÉNIA Ver plat parasite de l'intestin grêle humain après l'ingestion de viande de porc, de bœuf ou de poissons contaminés. Il peut atteindre jusqu'à 10 mètres de long.

Attention aux substances toxiques

Certains végétaux ne doivent pas être consommés crus car ils renferment des substances toxiques naturelles, tels le manioc (acide cyanhydrique), les haricots verts (phasine), la pomme de terre et l'aubergine (solanine). Des troubles digestifs (diarrhées, vomissements) peuvent aussi rapidement apparaître après la consommation de betterave crue (2). En revanche, le cru permet d'éviter l'apparition de substances comme l'**acrylamide**, les amines hétérocycliques et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) tel le benzopyrène, considéré comme un agent cancérogène, autant de produits générés par la cuisson à haute température (gril, barbecue, friture).

Certains antioxydants sont moins présents

La cuisson révèle cependant certains micronutriments. Le lycopène est un puissant antioxydant dont l'absorption est facilitée quand les aliments sont cuits et broyés. Les tomates fraîches en fournissent ainsi 3 à 5 mg/100 g, contre 13,5 mg/100 g pour la sauce tomate (3). D'autres caroténoïdes protecteurs (lutéine…) sont aussi davantage présents dans les végétaux cuits (poivron, carotte…). La vitamine A est également mieux assimilée quand les aliments sont cuits. En revanche, la cuisson augmente l'index glycémique (IG) de nombreux aliments. Par exemple, l'IG de la carotte passe de 16 à 47 une fois celle-ci cuite.

Le risque de contamination microbienne est plus élevé

La cuisson permet de détruire d'éventuelles bactéries (salmonelles, *Escherichia coli*, *Listeria*) et parasites (**ténia**, anisakis, un ver du poisson, etc.) (4). Il faut donc être attentif à la fraîcheur des produits et à leur mode de préparation, en veillant à respecter la chaîne du froid et en lavant dans plusieurs eaux les fruits et légumes. Par précaution, les femmes enceintes, surtout si elles n'ont pas été immunisées contre la toxoplasmose, ne doivent pas consommer d'aliments crus ou marinés. ■ **Sylvie Boistard**

PR ANNE-MARIE ROQUE-AFONSO
Directrice du Centre national de référence de l'hépatite A

Prévenir le risque d'hépatites

« Certaines hépatites (A et E) se transmettent par voie digestive. Elles entraînent une infection aiguë du foie qui se manifeste généralement par une grande fatigue et une jaunisse qui guérit spontanément. Les fruits et légumes produits dans des régions où l'hépatite A est endémique (Moyen-Orient), peuvent être contaminés par des eaux souillées. Il faut bien les nettoyer avant de les consommer crus. En France, les fruits de mer peuvent être contaminés par l'hépatite A et seule la cuisson (80 °C) élimine le risque d'infection. Quant à l'hépatite E, son réservoir principal est le porc. Une cuisson à cœur (70-80 °C) permet d'inactiver le virus. »

(1) Assessment of vitamin and carotenoid concentrations of emerging food products: edible microgreens, Zhenlei Xiao et al., *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012.

(2) La DGCCRF recommande, par prudence, d'éviter la consommation de betteraves crues, DGCCRF, 2017.

(3) Sauces tomate, pas de quoi voir rouge ? *60 millions de consommateurs*, avril 2019.

(4) Manger cru : quels sont les risques et comment les éviter ? Ministère de l'Agriculture, 2021.

ARTHUS-BERTRAND YANN / HEMIS.FR; PHOTO12/ALAMY/AYHAN ALTUN

Découvert au XIXe siècle près de Çanakkale (Turquie actuelle), le site de Troie renferme des millénaires d'occupations successives (au centre, en été 2024, des archéologues turcs fouillent une place publique de la fin de l'âge du bronze) et de nombreux trésors (en bas, le sarcophage d'Altıkulaç, près d'Hissarlik, daté du IVe siècle avant notre ère).

Troie

Sous les vestiges, le mythe

Depuis 160 ans, les archéologues ont retourné la colline d'Hissarlik, au nord-ouest de la Turquie, avec une pioche dans une main et souvent l'« Iliade » dans l'autre, rêvant de faire coïncider la réalité du terrain avec la Troie mythique célébrée par Homère. Un défi pour les chercheurs actuels qui tentent de garder la tête froide face à un site exceptionnel dont les premiers signes d'occupation humaine remontent à 3500 avant notre ère.

Par Sylvie Briet

Au sommet de la colline d'Hissarlik, au nord-ouest de la Turquie, l'histoire s'impose, lumineuse. Ce site qui abrite les ruines de la mythique cité de Troie domine le non moins prestigieux détroit des Dardanelles. Ici l'Asie, en face l'Europe ! L'importance stratégique du lieu justifie à elle seule guerres et légendes : Troie contrôlait le passage entre mer Égée et mer Noire. Il en reste un patchwork de vieux murs enchevêtrés, chaos pierreux énigmatique. Et la question jamais résolue : la guerre décrite par Homère dans l'*Iliade* a-t-elle eu lieu ? Une ville nommée Troie a bien été détruite à la fin de l'âge du bronze vers 1200 avant notre ère, époque supposée de la fameuse guerre entre les Grecs et les Troyens. Mais on ne saura sans doute jamais si l'histoire que racontent ces ruines correspond au récit du poète grec.

BRUNO BOURGEOIS

Pourtant, à Hissarlik, tout est fait pour que le visiteur se plonge dans la guerre de Troie : dès l'entrée, un très kitsch et monumental cheval de bois, construit dans les années 1970, est censé l'appâter. Il chemine ensuite le long d'un chemin tracé par les autorités turques qui gèrent le site. Au gré du relief, dominant des champs de céréales qui s'étendent jusqu'à la mer, il monte et redescend sans pouvoir suivre un itinéraire chronologique. Reyhan Körpe avance d'un pied sûr, il lit dans chaque pierre, selon sa couleur, sa taille, ▸

son scellement. Cet archéologue participe aux chantiers chaque été depuis plus de vingt ans, et enseigne le reste de l'année à l'université de Çanakkale, la ville la plus proche. Les nombreuses années de travail souvent ingrat n'ont pas émoussé sa passion. Il désigne une muraille datant de 1500 avant notre ère encastrée dans un escalier plus ancien de 1000 ans : *« Ici, nous sommes au milieu de l'âge du bronze vers 2500 avant notre ère, et au-dessus nous sommes entre 1700 et 1200 avant notre ère. Les bâtiments étaient plus élevés, plus solides. En face de nous, un mur du IIe siècle avant notre ère, un mur hellénistique, plus rectangulaire, plus régulier. Pour certaines époques, nous n'avons que des fondations. Tous les matériaux étaient réutilisés, ce qui rend l'ensemble très difficile à interpréter. »*

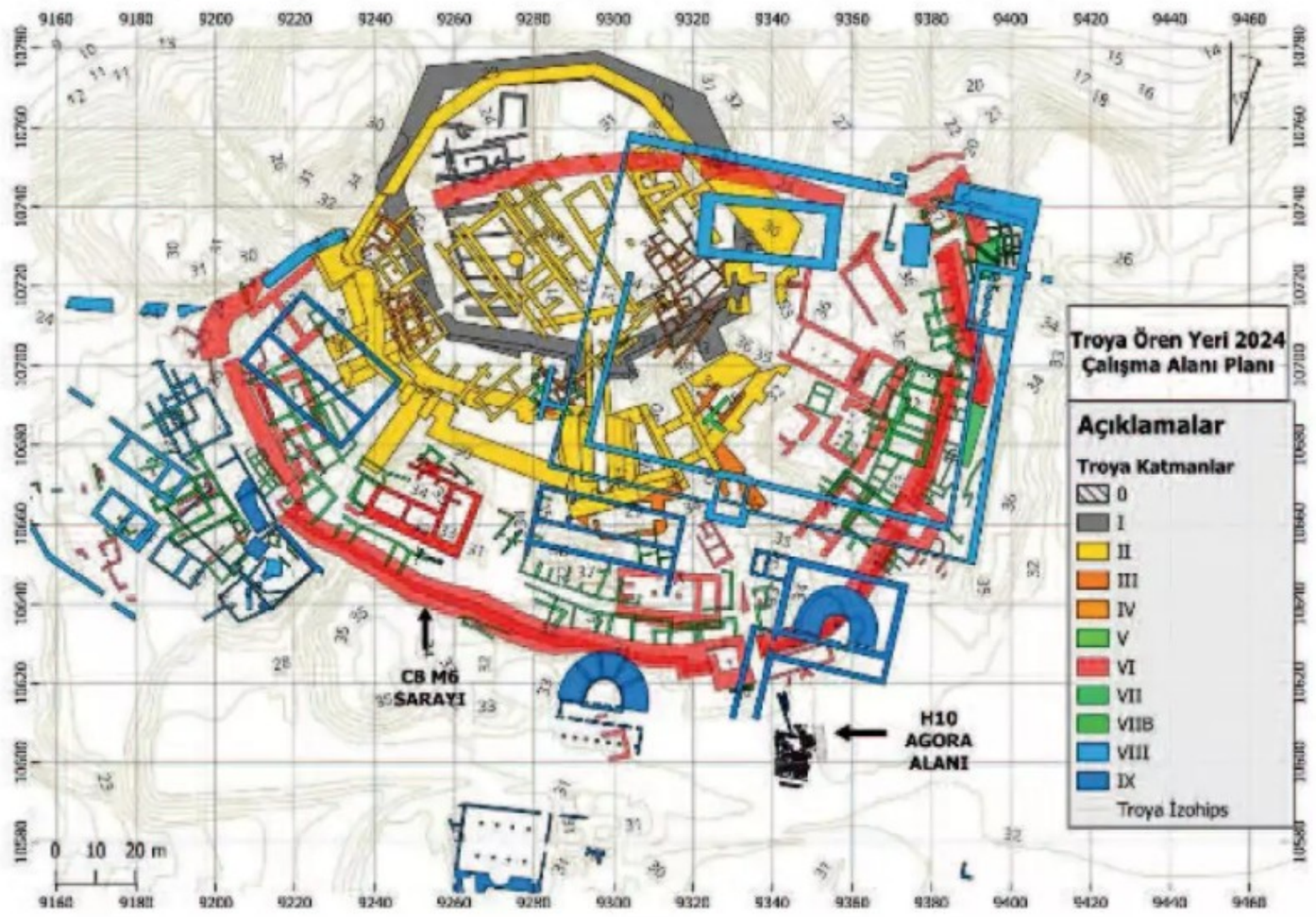
Les archéologues ont identifié dix grandes étapes notées de Troie 0 (IVe millénaire avant notre ère) à Troie IX (Ier siècle avant notre ère-VIe siècle de notre ère), dix villes plus imbriquées qu'empilées. *« Ici les Grecs ont détruit un mur et ont utilisé les pierres pour les fondations d'un bâtiment,* poursuit Reyhan Körpe. *Lorsque nous descendons une marche, nous franchissons 100 ans ! Dans ce fossé, nous voyons les traces de sept murs qui nous emmènent de Troie I à Troie VII »*. Il faut une bonne dose d'imagination pour visualiser la tour ou le palais de l'âge du bronze. Reyhan Körpe n'en manque pas, même s'il sourit de ses propres extrapolations : *« Là vous voyez les fondations d'une maison qui donne sur un champ, sur lequel la guerre aurait eu lieu. De cette maison, on avait une très bonne vue : Priam et ses proches pouvaient assister à la bataille et même voir le corps d'Hector, un des héros de l'*Iliade, *traîné, attaché à un char. »*

Une guerre vers -1200 entre Anatoliens et Mycéniens

Au-delà des légendes, la plupart des chercheurs s'accordent sur deux faits : les ruines d'Hissarlik appartiennent à la Troie d'Homère et des guerres ont eu lieu ici vers 1200 avant notre ère, soit la fin de l'âge du bronze, entre les Anatoliens et les Grecs mycéniens. À l'époque, deux grandes civilisations dominaient la région. Les Hittites régnaient sur l'Anatolie et les Mycéniens sur la mer Égée. Petit royaume indépendant qui suscitait forcément des convoitises, Troie (Wilusa dans les textes hittites) s'était placé sous la protection des Hittites vers 1280 avant notre ère. Et serait sans doute resté oubliée sans le récit d'Homère. Depuis 160 ans, les archéologues ont retourné la colline avec une pioche dans une main et souvent l'*Iliade* dans l'autre, rêvant bien sûr de faire coïncider la réalité du terrain avec la Troie mythique. Comme

CHRONOLOGIE

Les 10 villes imbriquées de Troie



TROY EXCAVATION ARCHIVE

Troie 0
(3500 av. J.-C.)
Occupation récemment confirmée à cette date, plus vieille qu'on ne le pensait de 600 ans.

Troie I
(3000-2550 av. J.-C.)
Village fortifié. Période dite de culture maritime, proche des sociétés des littoraux des mers Égée et de Marmara.

Troie II
(2550-2250 av. J.-C.)
Apparition de murs de fortification. Période où est daté le « trésor de Priam » nommé ainsi par Heinrich Schliemann.

Troie III
(2250-2200 av. J.-C.)
Expansion de l'activité de tissage et de la céramique à enduit rouge. Destruction de la ville par un incendie ou un tremblement de terre.

Troie IV
(2200-1900 av. J.-C.)
Âge du bronze ancien. Développement de la culture anatolienne avec notamment des bâtiments construits de façon mitoyenne.

Troie V
(1900-1750 av. J.-C.)
Construit sur les ruines de Troie IV. Développement des relations avec les mondes égéen et anatolien.

Troie VI
(1750-1300 av. J.-C.)
Âge du bronze moyen. Prospérité de la ville, avec une citadelle entourée de murs monumentaux et ville basse. Présence de céramiques mycéniennes.

Troie VII
(1300-720 av. J.-C.)
Fin de l'âge du bronze. Plusieurs phases de destructions. La ou les guerres qui ont inspiré l'*Iliade* auraient eu lieu à cette période.

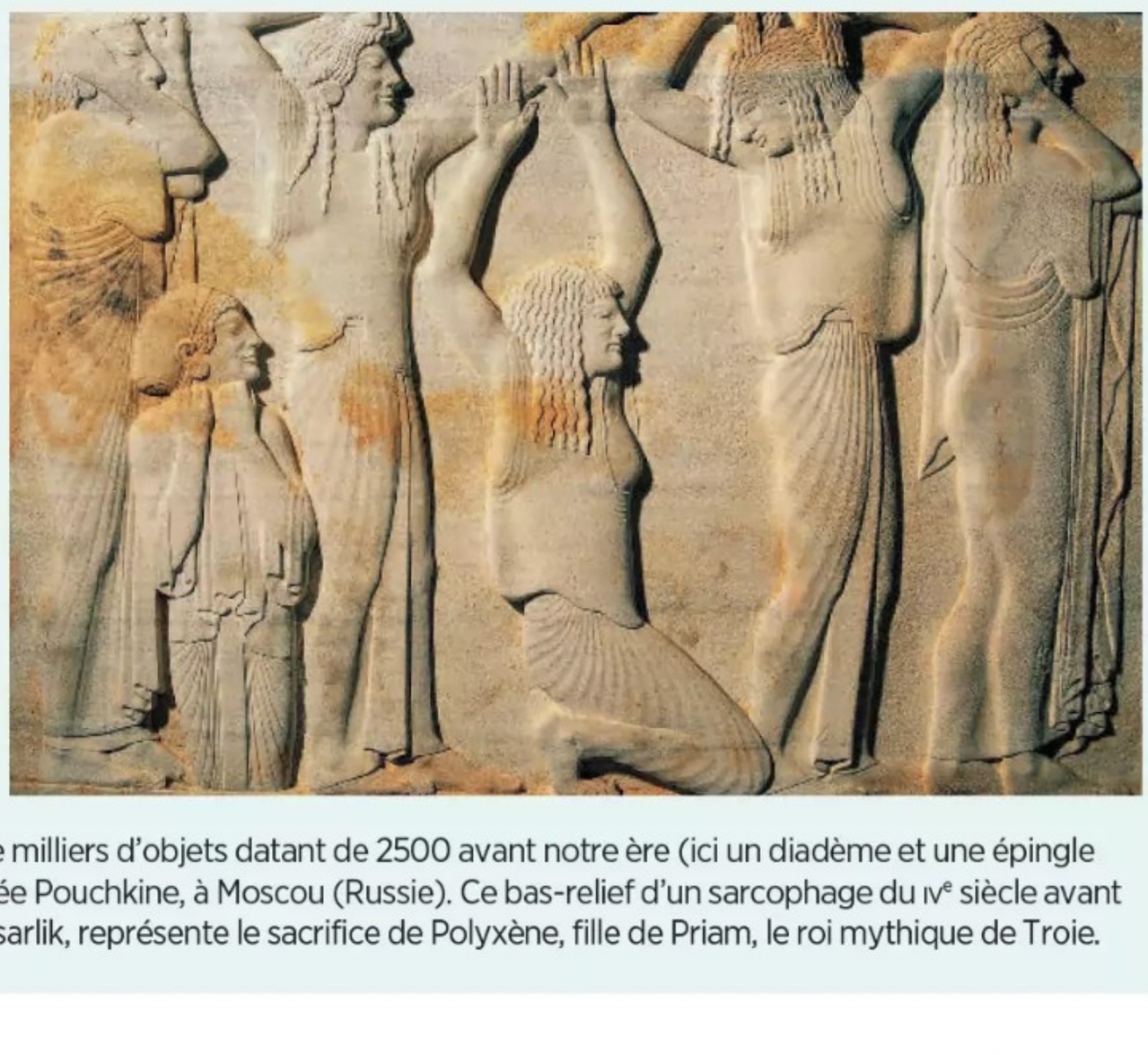
Troie VIII
(720-85 av. J.-C.)
Repeuplement du site par les Grecs qui nomment la ville Ilion. Visite d'Alexandre le Grand en -334.

Troie IX
(85 av. J.-C.-500 ap. J.-C.)
Période romaine avec des reconstructions ordonnées par les empereurs. Destruction de la ville par un tremblement de terre vers 500.

PATRIMOINE

Un musée archéologique en mal de trésor

Ouvert en 2018, le musée archéologique de Troie, cube d'acier géant posé à l'entrée du site, met en valeur de splendides œuvres couvrant 5000 ans d'histoire, résultat de 160 années des fouilles. Mais il y manque des pièces maîtresses, à commencer par le fameux « trésor de Priam », mis au jour en 1873 et nommé ainsi par son découvreur, l'Allemand Heinrich Schliemann, qui voulait y voir le trésor d'un héros de l'*Iliade*. En réalité, bijoux, bracelets, diadèmes, vases, boucliers… datent de 2500 ans avant notre ère, plus de mille ans avant l'époque où se situe le récit d'Homère. Il n'en demeure pas moins une découverte exceptionnelle qu'Heinrich Schliemann emporta secrètement en Grèce. Il fit don de ce trésor dérobé aux Turcs à l'empire allemand en 1881. Conservé au Musée ethnologique de Berlin, il fut emporté comme prise de guerre en Union soviétique en 1945… Et il se trouve exposé aujourd'hui au musée Pouchkine de Moscou! Le musée de Troie qui devrait en être propriétaire n'en présente que des photos. Mais Schliemann et d'autres dérobèrent à la Turquie bien plus que le trésor de Priam. Des milliers de vestiges de la cité seraient répartis dans 45 collections à travers le monde. La Turquie les réclame.



Le « trésor de Priam », riche de milliers d'objets datant de 2500 avant notre ère (ici un diadème et une épingle décorative en or), repose au musée Pouchkine, à Moscou (Russie). Ce bas-relief d'un sarcophage du IVe siècle avant notre ère, mis au jour près d'Hissarlik, représente le sacrifice de Polyxène, fille de Priam, le roi mythique de Troie.

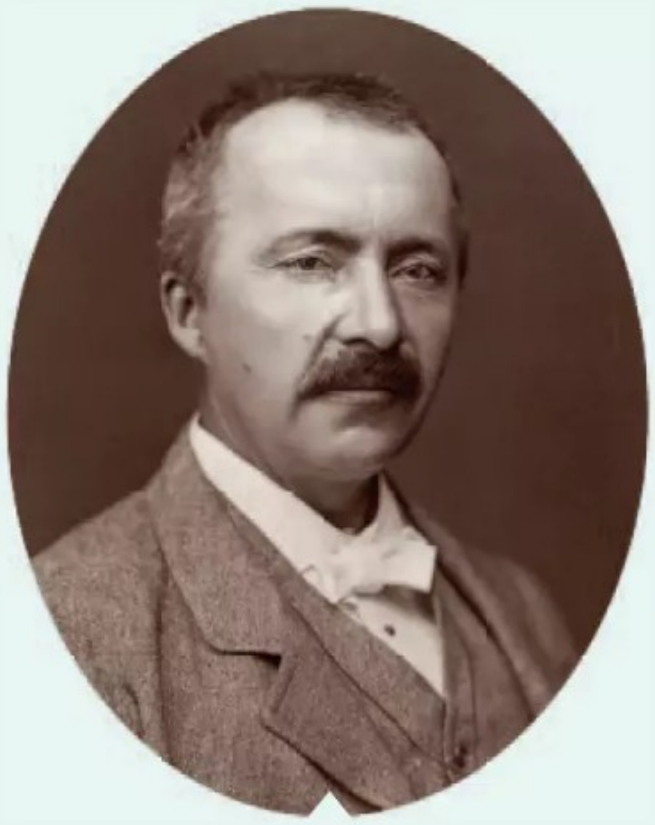
AURIMAGES ; RIDGEMAN IMAGES ; ALAMY/ PHOTO12

d'autres, en Égypte ou en Israël et Palestine, prennent la Bible pour boussole. Les premiers coups furent donnés en 1864 par le diplomate britannique Frank Calvert, propriétaire de la moitié du site. Après lui, l'homme d'affaires et aventurier allemand Heinrich Schliemann, considéré comme le découvreur de Troie *(lire l'encadré p. 80)* poursuivit les fouilles. Depuis, des générations d'archéologues allemands se sont succédé jusqu'en 2015, quand les Turcs décident de se réapproprier leurs chantiers. C'est ainsi que Rüstem Aslan, diplômé de l'université d'Istanbul et ancien collaborateur de l'Allemand Manfred Korfmann à partir de l'an 2000, est devenu le premier archéologue turc à diriger les fouilles de Troie. Ce dynamique chef de projet a déjà inscrit de belles avancées à son palmarès. Son équipe a récemment reculé l'âge de la ville de 600 ans! *« Jusqu'ici, nous n'en étions pas certains mais les datations de poteries l'ont confirmé : des gens sont venus et ont construit des maisons en 3500 avant notre ère ! »*, s'enthousiasme l'archéologue. Bien avant la guerre de Troie.
Une autre avancée récente concerne, elle, la bonne période. On sait depuis quelques années qu'une ville basse ▸

ARCHÉOLOGIE DE L'ARCHÉOLOGIE

Les fouilles de Troie sous l'œil des chercheurs

Comment les fouilles de Troie ont-elles été influencées par les convictions des archéologues ? Pour y répondre, l'université d'Amsterdam (Pays-Bas) développe depuis 2018 une nouvelle discipline, « l'archéologie de l'archéologie ». Ainsi Heinrich Schliemann, découvreur du site, qui employa 200 terrassiers turcs pendant trois ans sur sa fortune personnelle, assouvissait sa passion pour Homère, et voyait dans chaque objet le témoignage d'un protagoniste de l'*Iliade* ! *« Les archéologues rêvaient de relier les vestiges à la Troie mythique d'Homère,* explique Gert Jan van Wijngaarden, qui dirige le projet. *Ils se sont donc concentrés sur certaines couches de l'âge du bronze, au détriment par exemple des périodes grecques et romaines qui ont été chamboulées. Autre exemple : le matériau le plus utilisé sur le site durant l'âge du bronze est la terre crue, et nous avons retrouvé beaucoup de blocs* in situ *qui n'ont pas été étudiés, ne correspondant pas à l'idée qu'Heinrich Schliemann se faisait d'une architecture monumentale. Il préférait découvrir de la pierre. »* À l'aide de drones, l'équipe de Gert Jan van Wijngaarden a modélisé en 3D le site tel qu'il est aujourd'hui, montrant comment la topographie du lieu a changé. Depuis 160 ans, la colline d'Hissarlik a été éventrée, rabotée, creusée, et son sommet rabaissé de 15 mètres ! Les chercheurs d'Amsterdam réétudient donc des dépôts sortis de terre depuis ces nombreuses années ainsi que toute la documentation ! Ils ont même mené de nouvelles fouilles dans les fossés creusés par les archéologues précédents. *« L'archéologue allemand Carl Blegen, qui fouilla à Troie dans les années 1930, a recensé toutes les poteries d'origine grecque mycénienne qu'il a trouvées,* poursuit Gert Jan van Wijngaarden. *Mais il reste sur place de nombreux objets plus grossiers, d'origine anatolienne, qui n'intéressaient pas les chercheurs et ne figurent quasiment pas dans leurs publications. »* On découvre effectivement depuis quelques années l'importance, sous-estimée jusqu'alors, des relations entre Troyens et Hittites. Les résultats de l'équipe néerlandaise sont en cours de publication.



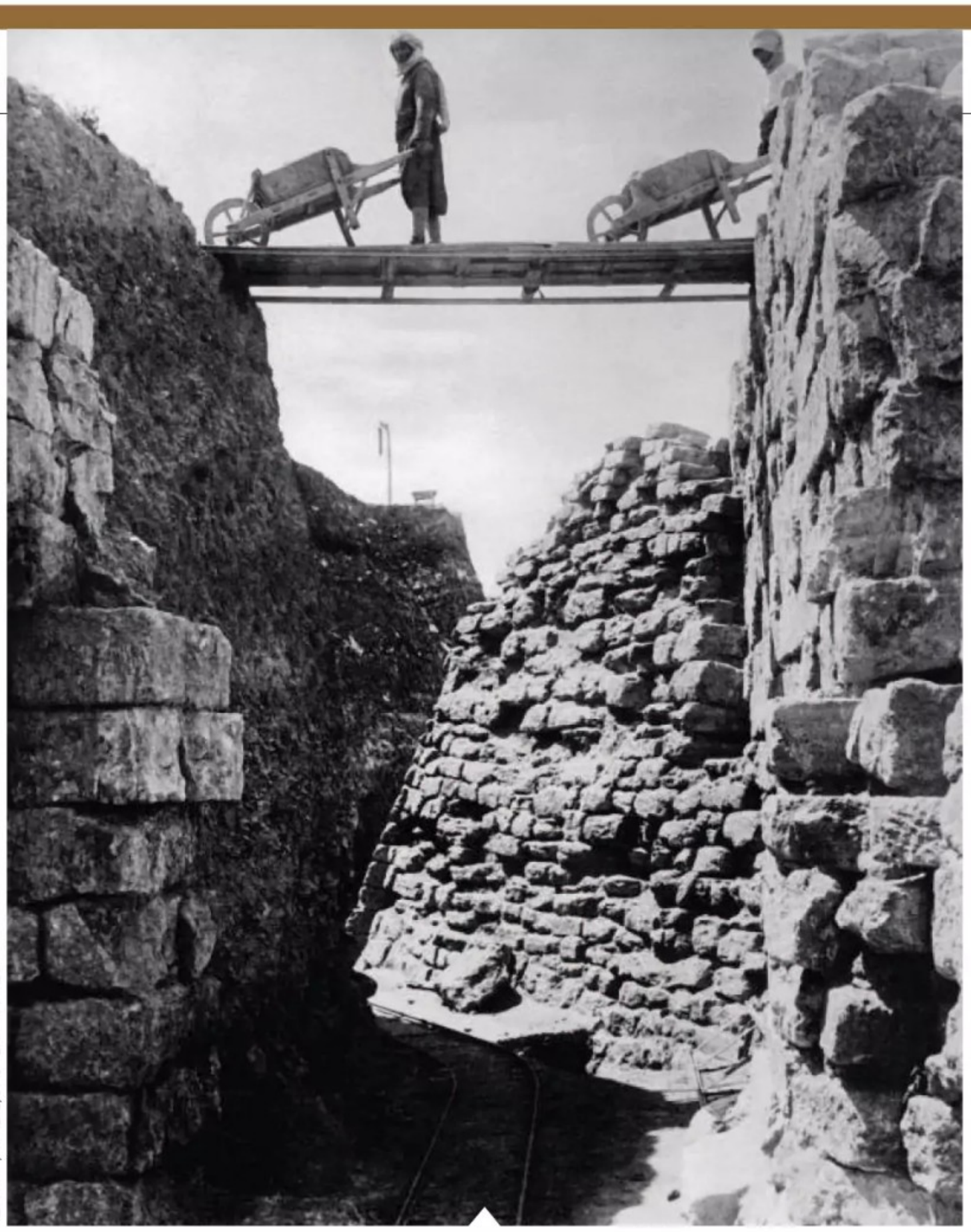
Heinrich Schliemann (1822-1890), découvreur de Troie, entreprit des fouilles à Hissarlik dès 1870, voulant prouver la véracité du récit homérique.

PHOTO12

▸ importante, entourée de fossés et de murs de fortification, s'étendait au pied de la citadelle, l'acropole fortifiée. Rüstem Aslan et son équipe en ont daté plusieurs éléments, notamment des fours, et confirmé qu'à la fin de l'âge du bronze, cette ville basse existait, donnant à Troie le statut d'une grande cité de 10 000 habitants environ. Elle commerçait avec le monde égéen à l'ouest et le royaume hittite à l'est : *« Les navires devaient attendre des vents du sud, assez rares pour passer le détroit,* raconte l'archéologue. *La mer était plus proche qu'aujourd'hui, le golfe plus profond. Les Troyens contrôlaient les Dardanelles et le port. C'était donc une ville maritime, riche. Aujourd'hui, nous concentrons nos fouilles sur cette partie basse, nous voulons comprendre comment elle fonctionnait, quels étaient ses liens avec la ville haute. »* Les archéologues turcs ont dégagé une entrée vers la citadelle, découvrant les restes d'une ancienne route de l'âge du bronze reliant les deux parties de la cité.

Faible présence d'armes dans les sous-sols

Contrairement aux pionniers du XIXe siècle, les archéologues d'aujourd'hui avancent prudemment, même si la presse turque les met sous pression… sans complexe : plusieurs journaux ont présenté la découverte de quatre squelettes cet été comme datant de l'époque de la guerre de Troie. En réalité, ils sont byzantins ! Rüstem Aslan veut garder la tête froide : *« Nous disposons de trois éléments,* explique-t-il : *des preuves archéologiques, des archives et le récit mythique. Nous essayons de nous cantonner à ce qui est avéré : la Troie mythique d'Homère n'existe pas mais il y a bien une ville d'Asie mineure occupée depuis l'âge du bronze ancien, dénommée Wilusa, qui donnera en grec archaïque Wilios puis Ilios et Ilion, autre nom de Troie, qui fut le théâtre d'affrontements vers le XIIe siècle avant notre ère. Des puits subitement abandonnés, des traces d'incendies et des destructions importantes montrent*



SZ PHOTO / SCHERL / BRIDGEMAN IMAGES

Les fouilles menées par l'homme d'affaires et archéologue autodidacte allemand Heinrich Schliemann sur les sites de Troie VI et VII emploieront 200 personnes durant trois ans.

qu'elle a subi un assaut de gens venus de l'extérieur. » Hélas, les archéologues n'ont retrouvé aucun écrit à Troie datant de cette période. Seules, des tablettes hittites mises au jour en Anatolie mentionnent Wilusa et évoquent des échanges entre l'empire de l'Est et les Troyens. Les objets en bronze (vases et bijoux) abondent dans les sous-sols de Troie alors que les armes sont très rares, en dehors de pointes de flèches ou de balles de fronde. Cela ne perturbe pas outre mesure Rüstem Aslan, qui explique : *« Les matériaux, notamment les armes, étaient très précieux et récupérés par les vainqueurs ».* À la fin de l'âge du bronze, l'empire hittite, comme celui des Mycéniens, s'effondre. Troie, partiellement abandonnée, continue à vivoter mais l'*Iliade* y exerce toujours son emprise. Car pour les Grecs puis les Romains qui s'installent dans la région, pas de doute, la Troie d'Homère se situe sur cette colline. Alexandre le Grand s'y arrête vers 334 avant notre ère, pour célébrer la victoire des Mycéniens et rendre hommage aux héros homériques qu'il considère comme ses ancêtres ! Le roi macédonien promet d'embellir la cité mais n'aura pas l'occasion d'y revenir.

Une attraction touristique pour les Romains

Les Romains s'inspirent, eux, de l'*Énéide* de Virgile et se présentent comme des descendants d'Énée, survivant de la guerre de Troie parti s'installer en Italie. César visite Troie en 47 avant J.-C., et repart déçu car il n'en reste qu'une modeste bourgade sans envergure. Vingt-huit ans plus tard, l'empereur Auguste, fils adoptif de César, s'inscrit aussi dans la lignée des Troyens, séjourne dans la cité, finance la restauration du temple d'Athéna Ilia et du théâtre. *« Chaque empereur promettait de revenir pour développer la cité mais aucun n'en eut l'occasion »*, déplore Reyhan Körpe, tandis que son ami Rüstem Aslan est convaincu qu'à l'époque, Troie était une attraction touristique pour les citoyens romains : *« L'économie de la cité reposait alors sur ce secteur »*, avance-t-il. Des statues d'Auguste et d'Hadrien, mises au jour dans les années 1990, portent des inscriptions indiquant que ces empereurs les avaient offertes à la ville. Pour le visiteur contemporain, ces ruines gréco-romaines sont un bonheur car, enfin, il peut identifier un amphithéâtre, des marches, des colonnes… Ou encore les vestiges d'un temple d'Athéna monté en briques et en bois par les Grecs et reconstruit en marbre par les Romains. Avec la christianisation, Troie sera placée sous l'autorité du patriarcat de Constantinople. Les tremblements de terre auront raison de la cité qui sombrera dans l'oubli pour quelques centaines d'années. Jusqu'à ce que des archéologues amoureux de l'*Iliade* prennent la pioche. ■

AFP

« Nous disposons de trois éléments : des preuves archéologiques, des archives et le récit mythique »

Rüstem Aslan, professeur d'archéologie à l'université de Çanakkale (Turquie), directeur des fouilles de Troie

Des peuples anciens dans les dunes d'Oman

Il y a 8000 ans, des populations semi-nomades vivaient dans le désert du Rub al-Khali, au rythme de la formation de lacs et de rivières à chaque saison des pluies. Les fouilles menées par une mission archéologique française permettent d'ébaucher le portrait de sociétés néolithiques singulières ayant mis au point leurs propres techniques de taille.

Dans les années 1950, alors qu'ils prospectent les terres arides de la péninsule Arabique à la recherche de nouveaux puits, des pétroliers saoudiens et américains tombent sur des pointes de flèches lithiques très sophistiquées reposant sur le sable. Conscients que ces petits objets ont une histoire à raconter, ils les confient à des chercheurs qui leur consacrent quelques discrètes publications dans les années 1970. En 2017, d'autres artefacts surgissent. Cette fois, ce sont les habitants de Maitan, un village situé dans le sultanat d'Oman, à la frontière entre le Yémen et l'Arabie saoudite, qui racontent en avoir vu en quantités dans le désert. Une prospection s'impose. En 2019, débute enfin une première fouille dans cette partie du Rub al-Khali (littéralement, « Quart Vide » en arabe), l'un des plus grands déserts de sable de la planète mais aussi l'un des plus inhospitaliers, avec des températures pouvant dépasser les 50 °C en journée et tomber sous la barre de 0 °C la nuit. Elle allait mettre en lumière un pan largement délaissé de l'archéologie : la préhistoire d'Arabie. *« Cette vaste zone aride du Moyen-Orient avait toujours été considérée comme un cimetière des éléphants, autrement dit comme morne et inintéressante »*, confie Vincent Charpentier, archéologue à l'Institut national de recherches archéologiques préventives (Inrap), qui dirige depuis 2010 la mission archéologique française Ja'alan Dhofar (consacrée au littoral omanais sur plus de 1000 kilomètres entre les gouvernorats d'Ach-Charqiya du Sud et du Dhofar). *« On s'est aperçus qu'il y a environ 8000 ans, des sociétés s'étaient développées dans ce désert d'une façon tout à fait particulière. »* Soit au moment où,

BRUNO BOURGEOIS

ADAM ALGHAFRY

« Cette vaste zone aride du Moyen-Orient avait toujours été considérée comme inintéressante »

Vincent Charpentier, archéologue à l'Inrap, directeur de la mission archéologique française Ja'alan Dhofar

en Mésopotamie, les premières cultures agricoles et agglomérations se développent, amorçant ce que l'on nomme la « révolution néolithique ». Si elles sont bien aussi qualifiées de néolithiques, les sociétés qui ont évolué à la même époque dans le Rub al-Khali n'ont pourtant laissé derrière elles ni céramique ni villages. Elles n'ont pas non plus élevé de bétail, tout au plus une vache et quelques chèvres. Elles ont en revanche disséminé de nombreuses meules (servant à broyer des végétaux), des outils en pierre taillée ou encore des ornements en coquillage dans des points bien précis. *« Ces populations ont investi ce que l'on appelle des "*sebkhas *interdunaires", qui autrefois étaient de verdoyants points d'eau »*, explique Tara Beuzen-Waller, géoarchéologue spécialiste des milieux arides dans l'équipe de Vincent Charpentier.

De verdoyants points d'eau en plein Rub al-Khali ? 9000 à 5000 ans environ avant notre ère, survient une période climatique particulièrement clémente en péninsule Arabique, appelée l'« optimum climatique de l'holocène », durant laquelle les températures globales sont plus élevées qu'au cours de toute l'ère préindustrielle. En Arabie, cette période coïncide avec « l'Arabie verte ». La limite des pluies de mousson se situe alors beaucoup plus au nord, au niveau des Émirats arabes unis, ce qui entraîne des précipitations moyennes annuelles plus importantes et une meilleure distribution de la ressource en eau dans le temps et dans l'espace. *« L'Arabie du Sud-Est bénéficie alors de deux saisons humides, une hivernale dominée par les dépressions méditerranéennes et une estivale par les pluies de mousson qui alimentent des lacs, des wadis* [des canyons typiques d'Oman] *et créent des zones dans lesquelles la végétation est luxuriante »*, décrit Tara Beuzen-Waller. Certains points comme l'actuelle région du Dhofar, au sud-ouest d'Oman, soumise à la mousson (*khareef* en arabe) chaque année entre juin et septembre, évoquent ces paysages disparus et permettent de mieux visualiser l'écosystème dans lequel évoluaient ces populations néolithiques.

JÉRÉMIE VOSGES - MARIA PIA MAIORANO ET AL., OCTOBRE 2024

Des pointes exceptionnelles à trois faces et des ornements en coquillage ont été découverts sur les sites de Shaqat Jadailah et de Urq Jadailah, dans le Rub al-Khali.

TARA BEUZEN-WALLER/MISSION FRANÇAISE EN OMAN

Des « centres » d'innovation au milieu du désert

Deux de ces zones « entre les dunes » sont actuellement fouillées : celles de Shaqat Jadailah et de Urq Jadailah, qui ne sont désormais plus que de larges étendues de sable et de poussière. Pourtant, entre 6500 et 4500 avant notre ère, elles ont vu s'établir de nombreux humains semi-nomades à l'identité culturelle forte. *« Il ne s'agit pas de quelques familles, mais bien de groupes importants qui*

viennent et reviennent en ces points de façon saisonnière, affirme Vincent Charpentier. *Ils forment de vraies communautés qui vivent sans doute dans des huttes ou sous des tentes, chassent les gazelles, les lapins, peut-être les autruches et les ânes sauvages, et qui ont mis au point leurs propres techniques de taille ne se retrouvant nulle part ailleurs dans le monde.* »
L'une de ces techniques, nommée « flûtage », a donné d'étonnantes pointes de flèche à trois faces qui représentent le sommet de la complexité technologique développée à cette période dans cette partie du monde. « *On les appelle pointes triédriques* », complète Maria Pia Maiorano, archéologue spécialiste de la péninsule Arabique qui travaille sur ces sites du Rub al-Khali. « *Au vu de leur finesse d'exécution, on peut aisément dire que Shaqat Jadailah et Urq Jadailah étaient des centres d'innovation.* »
Ces « centres », qu'on ne peut donc encore appeler « villages », sont tous à proximité de *sebkhas*, qui fonctionnaient comme des lacs temporaires durant les saisons humides et étaient des éléments géographiques essentiels dans les territoires dunaires. « *Il est possible que ces groupes aient voyagé à travers les dunes comme on voyage sur la mer, c'est-à-dire quand le temps est favorable* », suppose Tara Beuzen-Waller. De point en point, d'escale en escale. La vision est assez fantastique : des femmes, des hommes et des enfants aux parures de coquillages peuplant une partie du temps des terres parmi les plus arides de la planète et qui, à chaque saison des pluies, jouissent de l'eau qui revient en abondance sous la forme de lacs et de rivières turquoise au milieu des dunes recouvertes d'herbacées.
On serait tentés de voir ces peuples comme des tribus isolées du reste du monde, mais il n'en est rien. On sait notamment, grâce à une extraordinaire petite hache en jade polie et lustrée, fruit de nombreuses heures de travail, que des objets précieux étaient échangés sur de longues distances. « *Nous en avons retrouvé un exemplaire à Maitan, mais aussi plusieurs autres au sud d'Oman, qui appartenait à des groupes de la même culture et que nous étudions aussi le long des côtes* [lire l'encadré ci-dessus] », détaille Vincent Charpentier. Parce qu'elles sont en néphrite, l'autre nom du jade, elles viennent assurément du Yémen. Elles ont donc parcouru plus de 1000 kilomètres pour se retrouver ici.

Mille et une sociétés néolithiques

Reste un mystère : d'où venaient ces sociétés néolithiques d'Arabie ? Le débat est vif. Certains archéologues estiment que des groupes sont venus du Levant, apportant les « ingrédients » d'une néolithisation déjà en marche plus au nord. D'autres — parmi lesquels compte Vincent Charpentier — pensent qu'ils sont les descendants de paléolithiques locaux qui auraient mis au point sur place leurs propres innovations technologiques, sociales et culturelles. « *La culture Jōmon, au Japon, avait développé la céramique bien avant l'agriculture. Ses représentants n'élevaient pas d'animaux, ils pêchaient et collectaient des châtaignes et des glands*, rappelle Vincent Charpentier. *Il y a selon moi mille et une façons de définir ce qu'est une société néolithique. Celle qui a peuplé Oman il y a huit millénaires en est incontestablement une, même très originale.* » ■ **Marine Benoit**

SHUTTERSTOCK

Dans le Dhofar, les chutes d'eau d'Ayn Khor, à Salalah, évoquent les paysages disparus dans lesquels évoluaient ces populations néolithiques.

ARCHÉOLOGIE

Sur les côtes aussi, des communautés atypiques

À seulement quelques centaines de kilomètres des dunes du Rub al-Khali, d'autres sociétés préhistoriques ont évolué au même moment dans un environnement bien différent de celui des communautés du désert : le long de la côte arabe de l'océan Indien, où de nombreuses grottes leur ont servi de refuge. Pleinement tournés vers la mer, ces groupes puisaient leurs ressources dans les eaux poissonneuses qui s'étendaient face à eux. Sardines, poissons-chats, tortues, requins et même dauphins faisaient partie de leur régime alimentaire. On sait aussi qu'ils étaient cynophages, c'est-à-dire qu'ils consommaient du chien. *« C'est une vraie curiosité archéologique »*, assure Vincent Charpentier. Dès 5800 avant notre ère, ces populations avaient mis au point des embarcations, *« indispensables pour atteindre la grande île de Masirah qu'elles ont investie à cette période »*. Un des plus vieux bateaux au monde a d'ailleurs été mis au jour dans l'émirat du Koweït.

SCIENCES ET AVENIR
LES DOSSIERS

LES DOSSIERS

SCIENCES ET AVENIR

LA SCIENCE AU MOYEN ÂGE

Astronomie • Bestiaires
Médecine • Université • Musique
Alchimie • Notre-Dame
Chiffres arabes • Optique
Hildegarde de Bingen

SCIENCE PHOTO LIBRARY / NYPL / SCIENCE SOURCE / SUCRÉ SALÉ / GETTY IMAGES

en vente en kiosque

Controverse sur les neiges du Kilimandjaro

En 1848, un missionnaire allemand rapporte pour la première fois en Europe une description du sommet enneigé de la montagne africaine. Mais il se heurte aux « géographes de cabinet » qui font autorité à Londres. Cette controverse durera plus de dix ans et animera une large part de la communauté savante européenne.

Par Delphine Froment

« *Elles te feront un blanc manteau où tu pourras dormir…* » : qu'elles soient chantées par Pascal Danel, contées par Ernest Hemingway dans sa célèbre nouvelle de 1936, ou qu'elles tapissent les arrière-plans du *Roi lion*, d'*Out of Africa* ou de documentaires animaliers, les « neiges du Kilimandjaro » imprègnent notre imaginaire sur les paysages est-africains. Leur fonte est même régulièrement médiatisée et utilisée pour interpeller sur le dérèglement climatique en Afrique subsaharienne. Mais alors qu'aujourd'hui, la disparition des neiges du Kilimandjaro effraie, tant elles paraissaient éternelles au XXe siècle, peu savent que leur existence fut un jour âprement contestée. Et quand cette histoire est racontée, elle se résume souvent à ces quelques lignes : en 1848, un missionnaire allemand rapporte pour la première fois en Europe une description du Kilimandjaro et de ses neiges ; mais un géographe londonien refuse catégoriquement de croire à leur existence, sans s'être rendu lui-même sur place. Un fait divers plaisant, en somme, où l'incrédulité d'un homme est tournée en dérision tant il est désormais évident que les neiges du Kilimandjaro existent bel et bien.

DELPHINE FROMENT

Delphine Froment est maîtresse de conférences en histoire contemporaine à l'université de Lorraine.

Et pourtant, il s'agit là d'une véritable controverse géographique qui dura plus de dix ans et anima une large part de la communauté savante européenne au milieu du XIXe siècle.

Pourquoi l'existence des neiges du Kilimandjaro put-elle être contestée pendant si longtemps ? Et comment fut-elle finalement prouvée ? Ce sont des questions qui intéressent tout particulièrement les historiens des sciences, qui voient dans les controverses savantes l'occasion de comprendre comment se construisent les connaissances et comment s'administre la preuve. Car ces controverses, que ce soit dans leurs causes, leur développement ou leur résolution, se nourrissent rarement d'arguments purement scientifiques mais sont le plus souvent sous-tendues par d'autres enjeux : sociaux, économiques, politiques, etc. Le cas des neiges du Kilimandjaro est à ce titre exemplaire.

Tout commence en 1849 quand un géographe britannique, Charles Beke, annonce la découverte d'une montagne enneigée en Afrique de l'Est — il relaie le récit de voyage d'un missionnaire, Johannes Rebmann, qui s'est récemment rendu dans la région. Cette découverte, affirme Charles

ÉGLISE ÉVANGÉLIQUE DU WÜRTTEMBERG

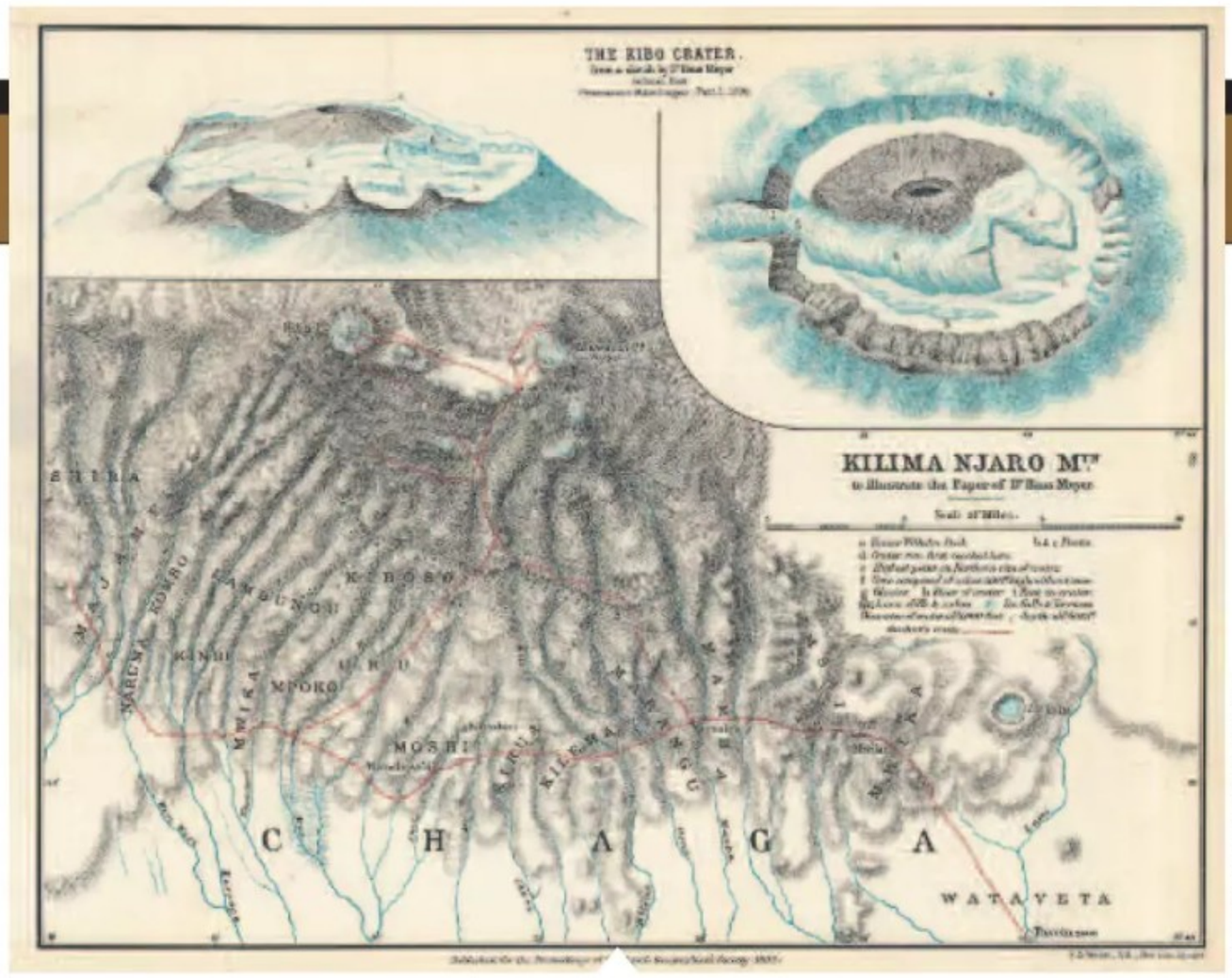
La caravane des pasteurs Johannes Rebmann et Johann Ludwig Krapf au pied du Kilimandjaro, en Tanzanie (peinture de 1886).

Beke, va permettre de lever le grand mystère des sources du Nil. Au IIe siècle, Ptolémée, dans sa *Géographie,* ne dit-il pas que le Nil prend sa source au pied de montagnes enneigées — les fameux « monts de la Lune » ? Et Johannes Rebmann ne s'est-il pas rendu aux abords du « Monomoezi », un nom que Charles Beke identifie comme swahili et pense pouvoir traduire par « royaume de la Lune » ? Le récit de Johannes Rebmann aurait pu passer inaperçu, mais l'intérêt que Charles Beke lui porte et le rapprochement qu'il fait entre le Kilimandjaro et le Nil le précipitent de manière inattendue au premier plan de la scène géographique, et, dès lors, sous le feu des critiques.

L'absence de mesures nuit à la crédibilité du récit du missionnaire

Dans les années 1840, Johannes Rebmann et son collègue Johann Ludwig Krapf sont les premiers Européens à s'être installés durablement sur la côte est-africaine, à Mombasa, et à se rendre dans l'intérieur, qui n'a pas encore été exploré par les Occidentaux. Mais leur objectif est d'évangéliser le continent. Et c'est avant tout de cela que parle le récit de Johannes Rebmann, ainsi que de ses rencontres avec les sociétés est-africaines. Il décrit aussi son itinéraire et les paysages marquants, mais sans jamais s'y attarder. Le 11 mai 1848, il a ainsi observé une très haute montagne, surmontée de quelque chose de *« remarquablement blanc »*. S'agit-il d'un nuage ? Le missionnaire est très myope, mais après quelques pas, il en est sûr : le sommet de la montagne est recouvert de neiges éternelles. Si Johannes Rebmann rend grâce à Dieu en lisant le psaume du jour face à l'immense massif, dont son guide lui dit qu'il s'agit du Kilimandjaro, il ne commente pas davantage la montagne. Parti seulement armé de sa Bible et de son parapluie, il n'a pas avec lui d'instruments de mesure lui permettant par exemple d'en estimer la hauteur.

C'est précisément l'absence de telles précisions qui va nuire à la crédibilité du récit de Johannes Rebmann. Après tout, il n'est qu'un missionnaire anonyme, inconnu de la scène géographique européenne. Or, face à lui s'élève un autre géographe, plus influent encore que Charles Beke : William Cooley, l'un des membres les plus anciens et les



Cartographie du Kilimandjaro illustrant un article de 1890 de l'explorateur allemand Hans Meyer, le premier à avoir atteint le sommet de la montagne trois ans plus tôt.

plus actifs de la prestigieuse Royal Geographical Society fondée en 1830 à Londres. Il reproche à Johannes Rebmann ses descriptions extrêmement allusives du Kilimandjaro. Surtout, le fait que Johannes Rebmann soit myope (et pourtant si prompt à affirmer que ce qu'il avait pris au loin pour un nuage était en réalité un manteau neigeux — éternel de surcroît) rend William Cooley encore plus sceptique. Non seulement le phénomène serait parfaitement inédit par rapport aux connaissances occidentales sur l'Afrique subsaharienne, mais en plus, une telle précipitation tranche avec la minutie à laquelle William Cooley est habitué, rendant les dires du missionnaire particulièrement invraisemblables à ses yeux.

William Cooley est en effet un géographe de cabinet, c'est-à-dire un savant qui réunit, recoupe et synthétise depuis son bureau toutes les informations qui lui parviennent sur un espace donné. Ces pratiques sédentaires le tiennent certes éloigné du terrain, mais sont alors très prisées de ses contemporains qui estiment qu'elles constituent la meilleure manière de construire un savoir par le recul qu'elles permettent. À cela s'ajoute le fait que Charles Beke a relayé le récit de Johannes Rebmann dans un contexte pour le moins douteux : il est en train de monter une expédition pour l'Afrique de l'Est et tente de lever des fonds. Aussi, l'annonce triomphale de la découverte d'une montagne enneigée dans cette région précise a tout du coup publicitaire pour une expédition qui se promet justement de trouver les sources du Nil…

William Cooley y est d'autant plus sensible qu'il redoute de voir sa notoriété mise à mal. Charles Beke pourrait bien lui voler la vedette s'il venait à résoudre une question aussi importante que celle des sources du Nil. Bref, aux arguments savants se mêlent d'autres enjeux. Car s'il a de bonnes raisons de douter d'un récit *a priori* peu vraisemblable et visiblement instrumentalisé par un autre géographe, William Cooley devient particulièrement virulent par crainte de se voir supplanté par les dires d'un obscur missionnaire.

Faute de preuve suffisante, une théorie alternative est avancée

Dans les années 1850, il multiplie ainsi les articles et ouvrages à charge contre Johannes Rebmann. Le missionnaire et ses soutiens essaient bien de contre-argumenter, en reprenant à leur compte les codes discursifs de la géographie savante, mais l'autorité qu'exerce William Cooley instille durablement le doute. Même Charles Beke, dont l'expédition a échoué, se met en retrait — tout comme la Société de géographie de Paris qui avait pourtant, en 1852, récompensé les explorations de Johannes Rebmann et Ludwig Krapf en leur attribuant sa Grande Médaille d'argent. Dans le même temps, les missionnaires sont contraints d'abandonner leur station est-africaine et ne peuvent retourner au Kilimandjaro. Aussi, faute de preuve supplémen-

ALTITUDE

Le Kilimandjaro, un sommet à 6000 mètres ?

Une autre dispute savante éclate autour du Kilimandjaro dans les années 1890. Elle met aux prises Hans Meyer, qui a fait la première ascension du sommet, et Bruno Hassenstein, le cartographe à qui il a commandé les cartes pour illustrer ses nombreux articles et ouvrages sur la montagne. Hans Meyer est convaincu que le sommet du massif, déjà réputé le plus haut d'Afrique, culmine à 6130 mètres. Bruno Hassenstein, alors particulièrement estimé et reconnu par ses pairs, est formel. Il a recoupé toutes les informations à sa disposition, issues des expéditions de Hans Meyer, mais aussi de nombreux explorateurs passés avant lui. Et d'après tous ses calculs, le Kilimandjaro ne peut pas faire plus de 5998 mètres. Hans Meyer fulmine et insiste. Il y va de son prestige personnel d'alpiniste et de celui de l'empire colonial allemand qui a pris possession du Kilimandjaro en 1886 : avoir conquis un 6 000 m est bien plus honorable qu'un 5 000 m.

La question n'est pas tranchée du vivant des deux hommes. En attendant, parce que Hans Meyer est le client et appartient à une élite influente, Bruno Hassenstein concède à contrecœur l'indication d'une altitude de 6130 m sur ses cartes… tout en laissant les 5998 m entre parenthèses ! Il était pourtant plus proche de la réalité : aujourd'hui, l'altitude du Kilimandjaro est estimée à 5895 m.

C'est finalement une expédition qui règle la question en 1861. Non, le Kilimandjaro n'est pas la source du Nil, mais il est bel et bien enneigé

taire, une théorie alternative est avancée en 1857 par Roderick Murchison et Heinrich Barth, deux savants proches de William Cooley, qui s'inspirent de David Livingstone et de ses voyages récents réalisés plus au sud dans la région : la blancheur du sommet du Kilimandjaro serait due à des roches de quartz blanc ou calcaires !

C'est finalement une expédition qui règle la question en 1861. Non, le Kilimandjaro n'est pas la source du Nil, mais il est bel et bien enneigé — les cercles savants européens en sont désormais définitivement convaincus. Pourquoi ? Tout simplement parce que les deux explorateurs qui mènent l'expédition sont Carl Claus von der Decken, un aristocrate, et Richard Thornton, un géologue, tous deux bien insérés dans les sociétés de géographie et reconnus par elles. Concrètement, ils ne prouvent d'aucune manière l'enneigement du Kilimandjaro. Mais ils ont pris d'autres mesures — thermométriques, barométriques, hypsométriques… —, et ces pratiques seules suffisent à convaincre la communauté savante. Il faut dire qu'au début des années 1860, la géographie de cabinet est de plus en plus décriée au profit de la géographie dite de plein vent, c'est-à-dire celle que les explorateurs pratiquent sur le terrain. Les connaissances qu'ils rapportent de leurs expéditions sont de plus en plus valorisées par rapport à celles que les géographes tels que William Cooley compilent en restant assis à leur bureau.

Et pendant que William Cooley sombre peu à peu dans l'oubli (il meurt en 1883 dans la plus grande indifférence), le Kilimandjaro accède à la célébrité et devient le but de nombreuses nouvelles expéditions d'exploration. En grande partie grâce à cette controverse, qui a fait couler tant d'encre pendant plus d'une décennie, ses neiges deviennent emblématiques. De fait, d'autres hautes montagnes enneigées ont été observées par la suite en Afrique de l'Est, mais les neiges du mont Kenya ou des monts Rwenzori n'ont jamais suscité la même fascination que celles du Kilimandjaro. ■

Une formidable diversité

11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous

N° 929/930
20 questions qui obsèdent les scientifiques

N° 931
La molécule miracle

N° 932
L'ordinateur quantique arrive !

N° 933
Prendre le contrôle de ses rêves

N° 934 Voie Lactée. Révélations sur les mystères de notre galaxie

N° 935
Spécial IA. Ce qu'elle change

N° 936
Les pouvoirs de la respiration

N° 937
La fin du Gulf Stream

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : 7 € par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France).
Bon de commande à retourner à :

Sciences et Avenir
service des abonnements
45, av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

❑ N° 929/930 ❑ N° 931 ❑ N° 932 ❑ N° 933
❑ N° 934 ❑ N° 935 ❑ N° 936 ❑ N° 937

Nom : .....
Adresse : .....
..... Ville : .....
Code postal : .....

TRANSVERSALES

NATHAN LAINE/HANS LICAS

Des patients franciliens ont dû être évacués par TGV vers des structures hospitalières en région moins affectées par le Covid-19 (ici en avril 2020, un départ de l'hôpital Beaujon, à Clichy).

Autopsie d'une catastrophe sanitaire

Avec « Les Juges et l'Assassin », les journalistes Gérard Davet et Fabrice Lhomme révèlent les errements des pouvoirs publics au début de la crise du Covid-19.

ENQUÊTE Un *« voyage en terre inconnue… dans les coulisses d'une catastrophe sanitaire d'une ampleur inédite »*. La remarquable enquête de Gérard Davet et Fabrice Lhomme met au jour l'irresponsabilité sidérante du pouvoir lors des six premiers mois de gestion de la crise du Covid-19. Une cinquantaine de rapports censés informer l'exécutif sur l'imminence d'une pandémie ont été ignorés. Le lecteur en sort sonné. L'instruction judiciaire à laquelle les auteurs ont eu accès est monstrueuse : 1 million de pages de documents saisis et épluchés, de manière totalement confidentielle, par la Cour de justice de la République. Et accablante : elle révèle errements et incompétences des autorités (une ministre de la Santé avouant ne pas connaître la différence entre épidémie et pandémie) et l'appauvrissement quasiment orchestré des administrations sanitaires. Elle met en cause Agnès Buzyn et Olivier Véran, ministres de la Santé successifs à l'époque, et Édouard Philippe, Premier ministre. Mais pointe aussi inconséquences et bassesses, dont témoignent mails et SMS saisis par les juges.

Agnès Buzyn, première à alerter sur la gravité de la crise, écrit néanmoins au Premier ministre, à propos de Jean-François Delfraissy : *« Le conseiller du PR* [président de la République] *et son Conseil scientifique sont de la daube… »* Valse-hésitation sur le port des masques, voire mensonges destinés à en couvrir la pénurie. Maintien du premier tour des élections municipales malgré le danger de contamination. Et retard dans la décision de confiner la population : *« Derrière vos décisions des gens vont mourir »*, avait encore rappelé Agnès Buzyn à Édouard Philippe… Cette enquête était nécessaire, ce livre aussi. ■

Andreina De Bei

Les Juges et l'Assassin,
Gérard Davet et Fabrice Lhomme,
Flammarion, 442 p., 23 €

SOMMAIRE

▶ C'est à lire p. 90
▶ C'est à voir p. 92
▶ Chroniques p. 94
▶ Questions de lecteurs p. 96
▶ Le ciel du mois p. 97
▶ Jeux p. 98

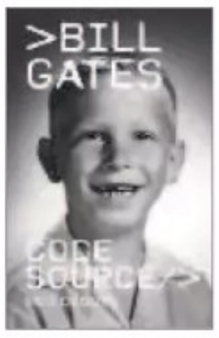
Souvenirs artificiels

IMAGES Après avoir cherché en vain une certaine photo d'enfance de lui et son frère, le psychologue Serge Tisseron décide de recourir à des logiciels d'intelligence artificielle pour recréer l'image d'après ses souvenirs. Ce livre raconte ce processus et les interrogations qu'il suscite. Jusqu'à ce que l'auteur retrouve la photo perdue. La confrontation avec l'image artificielle relance une réflexion non seulement sur l'IA mais aussi sur la construction et l'altération du souvenir, et l'émergence d'un nouvel imaginaire. **A. D.**

Le jour où j'ai tué mon frère. Quand l'IA fabrique la photographie de nos souvenirs, Serge Tisseron, Lamaindonne, 96 p., 20 €

Mémoires vives

AUTOPORTRAIT Comment devient-on un programmateur de génie et le cofondateur de Microsoft, l'entreprise qui a propulsé l'usage de l'ordinateur personnel ? Bill Gates revient sur ses jeunes années et analyse sans fard les amitiés et rencontres qui ont fait de lui cet homme-là. Une grand-mère joueuse de cartes qui met sa mémoire au défi et des parents qui accompagnent cet enfant différent. Mais aussi des amis qui forgent son ambition et des professeurs et programmateurs brillants qui accordent leur confiance à cet adolescent maigrichon. Un destin fascinant. **S. R.**



Code Source, Bill Gates, Flammarion, 416 p. 22,90 €

Pollution au chlordécone : un cas d'école

ENQUÊTE Nous avons tous entendu parler du chlordécone, mais avons-nous pris la mesure de cette crise sanitaire et environnementale ? Comment cet insecticide, interdit aux États-Unis dès 1978, a-t-il pu être massivement utilisé aux Antilles jusqu'au début des années 2000 ? Marie Baléo tente ici de répondre à cette question. Le pari est réussi : son enquête est fouillée et accessible. Une lecture utile, à l'heure où beaucoup envisagent de détricoter nos normes environnementales. **I. do O'G.**

Les Empoisonneurs. Chlordécone : histoire d'un mépris français, Marie Baléo, Grasset, 272 p., 22 €

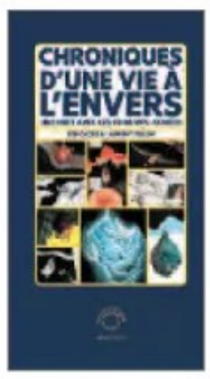
La Terre face aux astéroïdes

COLLISIONS Tous les dix ans, un astéroïde de la taille d'un camion explose dans la haute atmosphère en libérant une énergie dix fois supérieure à la bombe d'Hiroshima. Une fois par siècle, c'est un corps rocheux de la taille d'un immeuble qui percute notre planète avec la capacité de détruire une ville entière. Enseignant en France et aux États-Unis, Charles Frankel présente un panorama très complet de la science des impacts. *« J'ai eu la chance de vivre le développement de ce domaine d'avant-garde qui a propulsé les impacts cosmiques sur le devant de la scène, et d'être le témoin privilégié de fascinantes découvertes comme celle du cratère de Chicxulub au Mexique, responsable du massacre des dinosaures »*, signale le géologue. Il explique ainsi comment les astéroïdes potentiellement menaçants sont répertoriés, les risques d'impacts calculés, et par quelles techniques nous pourrions protéger un jour la Terre d'une collision dévastatrice. Mais l'auteur souligne aussi l'importance des impacts d'astéroïdes dans la datation des surfaces planétaires. ■ **Franck Daninos**

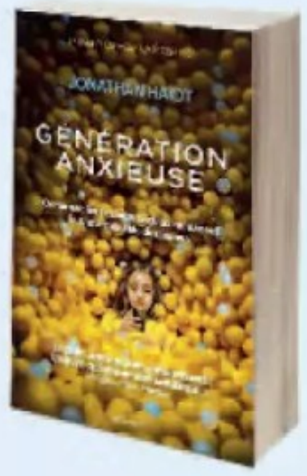
Bombes cosmiques, Charles Frankel, Seuil, 208 p., 21 €

Une nuit avec les chauves-souris

BD Un grand spécialiste des chauves-souris et un dessinateur s'allient pour raconter la vie et l'œuvre des 38 espèces de mammifères volants présents en Europe. Parmi eux, Jean-Pierre, un petit rhinolophe espiègle et curieux, joue le rôle du vulgarisateur : il détaille l'anatomie, les habitudes alimentaires, et la gamme de fréquences de signatures acoustiques de ses congénères. Une pédagogie à la fois drôle et complète portée par des dessins pointus. **A. De B.**



Chroniques d'une vie à l'envers, Sébastien Cazes et Laurent Tillon, Actes Sud, 136 p., 22 €



L'intoxication numérique des jeunes

SANTÉ MENTALE L'explosion des troubles anxieux et dépressifs observée depuis 2010 chez les jeunes nés après 1995 serait due à l'arrivée des smartphones et l'accès illimité aux réseaux sociaux qu'ils permettent. C'est la thèse de Jonathan Haidt, professeur de psychologie sociale, dans ce best-seller vendu à plus d'un million d'exemplaires aux États-Unis et dont la traduction vient de paraître. À grand renfort de chiffres et d'analyses, l'auteur avance que le smartphone aurait donné lieu à un *« grand recablage »* de l'enfance : surprotection dans le monde réel et sous-protection dans le monde virtuel. Un cocktail explosif pour leur développement émotionnel. Et de rappeler que *« les jeunes de la génération Z sont les premiers de l'histoire à traverser la puberté avec un portail en poche qui les éloigne de leur entourage et les attire dans un univers alternatif excitant, addictif et instable »*. ■ **Hugo Jalinière**

Génération anxieuse, Jonathan Haidt, Les Arènes, 448 p., 24,90 €

EXPOSITIONS

Alise-Sainte-Reine (21)

César, tous les chemins mènent à Rome
Jules César imprègne l'imaginaire collectif. L'exposition retrace l'ascension vers le pouvoir de cette figure autant admirée que détestée.
MuséoParc Alésia, 1, route des Trois-Ormeaux, jusqu'au 30 novembre. Rens. : Tél. 03.80.96.96.23.

Lille (59)

Arts et préhistoire
Outre 90 reproductions d'œuvres d'art préhistorique (objets gravés, peintures rupestres…), une expérience numérique permet d'explorer les grottes ornées du monde entier, de Lascaux aux falaises de Huashan (Chine).
Forum des sciences, 1, place François-Mitterrand, jusqu'au 31 août. Rens. : 03.59.73.96.00.

Lyon (69)

Trop forts !
Les 8-12 ans sont invités à découvrir des animaux capables de survivre dans les conditions les plus extrêmes (altitude, climat, toxicité…). À l'appui, dioramas, films d'animation et dispositifs interactifs.
Musée des Confluences, 86, quai Perrache, jusqu'au 31 décembre. Rens. : www.museedesconfluences.fr

Montbéliard (25)

Oups ! Au cœur de l'erreur
Le thème de l'erreur rassemble découvertes scientifiques et inventions d'ingénieurs au même titre que des accidents spatiaux ou des catastrophes industrielles. De la pénicilline à Fukushima (Japon) en passant par le Velcro.
Pavillon des sciences, 1, rue de l'Écoquartier, jusqu'au 31 août. Rens. : 03.81.91.46.83.

Monaco

Méditerranée 2050
Sur plus de 1000 m², c'est de l'avenir de la Méditerranée qu'il est question, dans le cadre d'un espace immersif. Un voyage temporel portant jusqu'à 2050 expose la richesse d'un écosystème qui abrite plus de 17 000 espèces.
Musée océanographique de Monaco, avenue Saint-Martin. Rens. : musee.oceano.org

Nantes (44)

Electric Op
Soixante ans d'art optique et d'art numérique en 80 œuvres : vidéos peintures, sculptures, installations numériques. Le parcours traverse cinq sections, consacrées à la binarité, à la 3D ou au pixel.
Musée d'Arts, 10, rue Georges-Clemenceau, jusqu'au 31 août. Rens. : 02.51.17.45.00.

Narbonne (11)

Escale en Méditerranée romaine, les ports antiques de Narbonne
Narbo Martius était un carrefour commercial majeur du Ier au VIe siècle. Plus de 150 objets archéologiques racontent ce système portuaire complexe, entre Narbonne et les étangs alentour.
Narbo Via, 2, avenue André-Mècle, jusqu'au 21 septembre. Rens. : 04.68.90.28.90.

Paris (75)

Déserts
Du Sahara aux déserts polaires, 200 spécimens et objets évoquent des milieux *a priori* hostiles à la vie, mais où animaux et végétaux ont réussi à s'adapter. Une biodiversité qui inclut l'humain.
Grande Galerie de l'évolution, 36, rue Geoffroy-Saint-Hilaire, jusqu'au 30 novembre. Rens. : 01.40.79.56.01.

Jardiner la ville
Cette exposition-atelier propose trois espaces (sélection de projets citoyens, matériauthèque, maquette géante manipulable) pour expérimenter les possibilités de végétalisation urbaine.
Cité de l'architecture et du patrimoine, 1, place du Trocadéro et du 11-Novembre, jusqu'au 25 septembre. Rens. : 01.58.51.52.00.

© EL SALAURENT

Des ateliers ludiques permettent aux plus jeunes de mieux comprendre qui sont nos compagnons à quatre pattes.

Paris (75) / Exposition

Chiens et Chats

Vous croyez les connaître sur le bout de la truffe, et pourtant… Vous apprendrez forcément quelque chose sur nos animaux de compagnie (23 millions en France) dans cette exposition, tant elle regorge d'informations. Science à l'appui, vous saurez si un chat retombe toujours sur ses pattes ou si les petits chiens sont forcément les plus hargneux. Déjà présentée il y a dix ans, elle s'est exportée dans plusieurs pays, et revient dans une version *« largement enrichie »* avec des contenus mis à jour (notamment sur le bien-être animal) et de nouveaux dispositifs. Des ateliers ludiques (test d'agilité au slalom ou d'équilibre, imitation de saut félin, quiz, jeux sonores…) voisinent avec beaucoup de textes et de vidéos. Ce qui n'empêche pas l'évocation de notions plus arides tel le statut des animaux de compagnie, reconnus depuis 2015 dans le Code civil comme des *« êtres vivants doués de sensibilité »*. Une étape qui a marqué un changement dans la manière dont nos sociétés perçoivent et protègent nos chiens et nos chats. Lire notre reportage : sciav.fr/938chat ■ **Lise Loumé**

Cité des sciences et de l'industrie, 30, avenue Corentin-Cariou, jusqu'au 28 juin 2026. Rens. : 01.85.53.99.74.

Scannez ce QR code et retrouvez toutes les expositions dans notre guide

REJOIGNEZ **LE PREMIER PÔLE SCIENTIFIQUE** DE LA PRESSE FRANÇAISE

SCIENCES ET AVENIR

LE MENSUEL

LE HORS-SÉRIE

UNE INFORMATION THÉMATIQUE
CLAIRE ET VIVANTE

Chaque trimestre, une thématique étudiée sous tous ses aspects, en compagnie des plus grands spécialistes.

UNE VISION COMPLÈTE
DE LA SCIENCE

Chaque mois, toute l'actualité scientifique, dans un langage accessible.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur sciencesetavenir.fr

39 JOURNALISTES PASSIONNÉS

19 PARUTIONS PAR AN

4,6 MILLIONS DE LECTEURS

2,6 MILLIONS DE SOCIO-NAUTES

2,7 MILLIONS DE VISITEURS SUR LE SITE

3 APPLICATIONS IOS/ANDROID

La Recherche

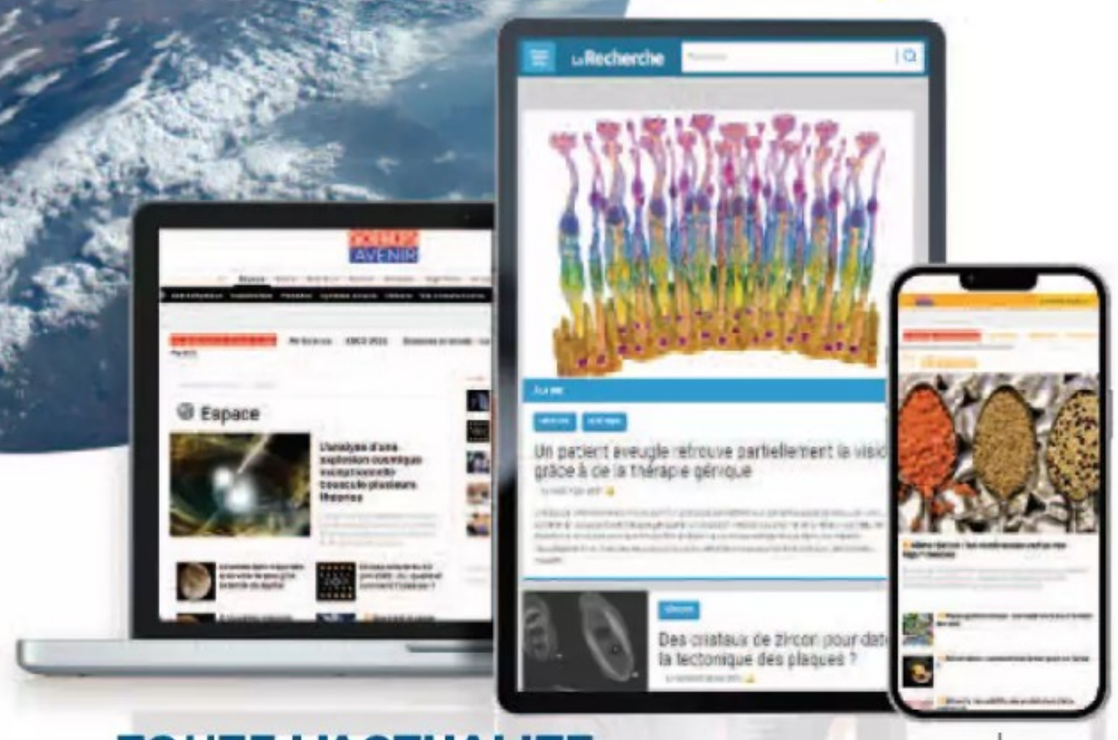
LE TRIMESTRIEL

LA RÉFÉRENCE
INCONTOURNABLE

Chaque trimestre, un panorama complet en 150 pages de la recherche scientifique.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur larecherche.fr

2 SITES POUR DES INFOS EXCLUSIVES



TOUTE L'ACTUALITE SCIENTIFIQUE QUOTIDIENNE

2 sites au service de l'actualité scientifique, de la plus accessible à la plus innovante. **Des articles quotidiens** pour être à la pointe de la science.

Vos questions en direct aux chercheurs sur notre chaîne Twitch https://www.twitch.tv/sciencesetavenir/

plus de 2 millions de fans !	plus de 303 000 followers	plus de 165 000 instagrammeurs	Plus de 67 000 abonnés professionnels	plus de 23 000 abonnés

PROMINT-SCAV2

Céline Guivarch, directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 3.

Christophe Cassou, directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec, groupe 1.

A. BILLET/UNIVERSCIENCE

CLIMAT PAR CÉLINE GUIVARCH ET CHRISTOPHE CASSOU

Le Giec et ses scientifiques au cœur de la tempête américaine

Les sciences du climat subissent une attaque brutale et inédite aux États-Unis, avec des licenciements massifs, des accès aux données entravés et des financements coupés pour les recherches comportant des mots-clés tels que changement climatique, énergie propre ou qualité environnementale. Mais cette guerre éclair ne s'arrête pas aux frontières américaines ; elle sape déjà le fonctionnement d'institutions internationales dont le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec). La coprésidente du groupe de travail sur l'atténuation, Katherine Calvin, s'est vu interdire sa participation à l'assemblée plénière de fin février. Le Giec va devoir travailler dans un contexte hostile. Des incertitudes émergent quant à la nomination des nouveaux auteur(e)s pour le 7e et prochain rapport général. Des sujets cruciaux ont été enlevés de la table des matières : « évaluation des politiques climatiques », « coût de l'inaction « ou encore « accélération des actions d'atténuation ».

Et il n'y a toujours pas d'accord sur le calendrier de publication de ce rapport, qui doit faire un point sur l'avancée des actions mondiales. Sa sortie avant 2028, année charnière des négociations internationales sur le climat, est rendue de plus en plus hypothétique. Certains pays voudraient éviter que ce point puisse s'appuyer sur les éléments de connaissance évalués de manière objective, ce qui conduirait inévitablement à une fragilisation des décisions. C'est l'existence même du multilatéralisme en matière de changement climatique qui est en péril. Ce n'est pas en cassant le thermomètre, et en broyant les scientifiques qui le lisent, que l'on se protégera des effets du changement climatique. C'est suicidaire. ■

Professeure à l'université Claude-Bernard Lyon 1. Dernier ouvrage publié : *Le Rulpidon sous toutes ses coutures*, Dunod, 2024.

CAMILLE CIER/HANS LUCAS

MATHS PAR SYLVIE BENZONI-GAVAGE

La science des fourneaux

Recette pour faire 16 crêpes : 375 g de farine, six œufs, ¾ de litre de lait. Et pour 24 crêpes ? Je vous laisse adapter les proportions ! Mais n'allez pas croire que ce sont les seules maths intervenant en cuisine. Des mathématiciennes britanniques se sont ingéniées à vous le prouver dans de savoureux livres : Eugenia Cheng avec *Comment cuire un 9* (Flammarion) ; Katie Steckles avec *Les Mathématiques du milkshake* (EDP Sciences). Et ce n'est pas tout. Il y a aussi de l'informatique dans votre cuisine.

Ne serait-ce que dans vos recettes préférées, qui sont des exemples d'algorithmes. D'ailleurs je vous ai trompé en annonçant une recette de crêpes : oui, j'ai oublié le beurre mais, surtout, si vous la donnez telle quelle à un robot humanoïde, sans plus d'instructions, il saura au mieux en faire un mélange plein de grumeaux et de coquilles d'œuf ; vous serez loin d'avoir la moindre crêpe à vous mettre sous la dent. Un algorithme doit être précis et complet pour donner le résultat attendu. Autre cas de figure : vous voulez préparer et cuire plusieurs desserts, dans quel ordre le faire pour qu'ils soient prêts en un minimum de temps ? C'est ce qu'on appelle un problème d'ordonnancement en informatique. Vous trouverez des explications dans le livret de l'exposition Dans ma cuisine (Maison des mathématiques et de l'informatique de Lyon, jusqu'au 28 juin), où de nombreux sujets sont abordés et il n'est pas du tout question de proportions. ■

ÉTHIQUE PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA

IA générative : l'insoluble trilemme de l'estomac

Professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *L'I.A. expliquée aux humains*, Seuil, 2024.

Pour Paul Valéry, penseur visionnaire s'il en est, *« plagiaire est celui qui a mal digéré la substance des autres : il en rend les morceaux reconnaissables. L'originalité est affaire d'estomac »* (1). Les très voraces modèles d'intelligence artificielle générative (IAg) ont indubitablement de gros estomacs : ils avalent tout de go d'immenses corpus d'œuvres en tous genres, textes, musiques et images, sans en paraître aucunement incommodés. Certains artistes s'en inquiètent, craignant qu'ils rivalisent bientôt d'originalité avec eux. D'autres, tout autant artistes, se révoltent contre une appropriation frauduleuse : on siphonne leurs œuvres sans vergogne pour les en spolier. Des instances nationales, en particulier le ministère de la Culture (2), et européennes se penchent sur le problème. Pour elles, il suffirait d'un cadre législatif bien pensé afin de rétribuer les auteurs à un juste prix. Or, l'affaire ne se résout pas à seuls coups de règlements, car ce n'est pas uniquement une histoire d'argent. La fabrication des modèles d'IAg efficaces exige qu'on leur transfère la plupart des œuvres humaines. Lorsqu'un pan entier de la production littéraire et artistique n'y figure pas, l'apprentissage s'en trouve d'autant diminué. Il en résulte une occultation inadmissible de la culture correspondante. On devrait donc encourager une inclusion de toutes les composantes de toutes les cultures. Mais, si tout y est, le métier de l'artiste risque d'être remis en question, soit que les machines fassent vraiment preuve d'originalité, auquel cas les artistes se retrouveraient dépossédés et deviendraient inutiles, soit qu'elles laissent transparaître des morceaux de ceux dont elles s'inspirent, par exemple des tournures de style ou des visages d'acteurs connus ou encore des intonations de voix. Et, dans cette dernière éventualité, ils seraient plagiés. Bref, qu'ils digèrent trop ou trop peu, trop bien ou pas assez, les gros estomacs des modèles d'IAg posent d'insurmontables problèmes et nous donneront bientôt de sacrées crampes d'estomac ! ■

(1) Paul Valéry, *Rhumbs* (1926) ; (2) sciav.fr/938culture

BRUNO LÉVY

L'ŒIL DE LASCAR

Les femmes possèdent deux chromosomes X dont l'un est naturellement inactivé. Mais des chercheurs ont découvert qu'il se réactive avec l'âge dans l'hippocampe, une région clé de la mémoire. Ce phénomène favorise la production de PLP1, une protéine essentielle à la transmission des informations entre neurones, contribuant ainsi à un vieillissement cérébral plus lent. **O. L.**

QUESTIONS DE LECTEURS

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

DERMATOLOGIE

Peut-on être allergique aux vêtements et chaussures neufs?

Gerard C.

« *Des cas d'allergies et d'irritations cutanées en lien avec des vêtements ou des chaussures sont régulièrement rapportés* », alertait en 2018 l'Agence nationale de sécurité sanitaire (Anses). Celle-ci soupçonne diverses substances, dont l'usage est réglementé dans l'industrie textile en France mais pas interdit, d'être à l'origine de ces symptômes: par exemple, la paraphénylènediamine, le chrome 6, le nickel et les colorants azoïques. L'Anses recommande de laver, avant de le porter pour la première fois, tout vêtement susceptible d'entrer en contact avec la peau. Elle conseille également, en cas d'irritation ou d'allergie après l'achat de vêtements ou de chaussures, de consulter un dermatologue ou un allergologue. ■ **L. L.**

ASTRONOMIE

Quelle est la couleur de l'Univers?

Konate I.

Si la lumière des milliards de galaxies peuplant notre univers était étalée sur l'ensemble de la voûte céleste, le mélange serait beige clair! C'est la conclusion, en 2002, d'une équipe d'astronomes américains qui a analysé la lumière de 200 000 galaxies. À l'époque où les premières étoiles se sont formées, l'Univers était dominé par des étoiles massives et chaudes émettant principalement de la lumière bleue. Mais au fil des milliards d'années, ces étoiles ont vieilli et ont été remplacées par des étoiles plus froides, émettant une lumière rouge orangé. Le mélange de ces couleurs produit ainsi une teinte beige. ■ **L. L.**

MICHEL GILE/BIOSPHOTO

Une végétation variée, mêlant plantes mellifères, arbres, arbustes, légumineuses, est bénéfique à l'écosystème.

AGRONOMIE

Que planter dans son jardin pour être utile à la biodiversité?

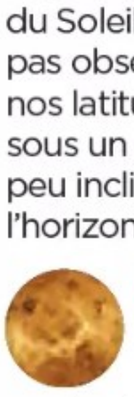
Julien C.

Planter des espèces végétales qui favorisent la biodiversité, enrichissent les sols et offrent un habitat à la faune locale, quelle bonne idée ! Pour les pollinisateurs, tels que les abeilles et les papillons, il est conseillé de mettre dans son jardin des plantes mellifères, c'est-à-dire produisant de bonnes quantités de nectar et de pollen : aubépine, cerisier sauvage, bruyère, sauge, origan... Aménager des habitats comme des tas de branches, des mares ou des espaces non fauchés favorise l'installation de hérissons, tritons ou papillons, qui jouent un rôle crucial dans l'équilibre écologique. Autre idée pour accueillir insectes, oiseaux et petits mammifères : composer sa haie d'arbustes fruitiers (groseilliers, framboisiers) et d'arbres (chêne, érable champêtre). Pour enrichir naturellement le sol en azote, il est recommandé de planter des légumineuses comme les pois et haricots, qui évoluent en symbiose avec des bactéries. Cette mesure favorise la fertilité de la terre, mais permet aussi de réduire l'utilisation d'engrais chimiques. Les plantes couvre-sol, comme la phacélie ou le trèfle blanc, protègent le sol de l'érosion et améliorent sa structure. Le paillage naturel (feuilles mortes, résidus de tonte) nourrit les décomposeurs comme les cloportes et vers de terre, essentiels à la fertilité. Enfin, pour respecter l'écosystème local, il est important de réduire l'utilisation des machines à moteur (motoculteur, tondeuse, débroussailleuse). ■ **Lise Loumé**

LE CIEL D'AVRIL

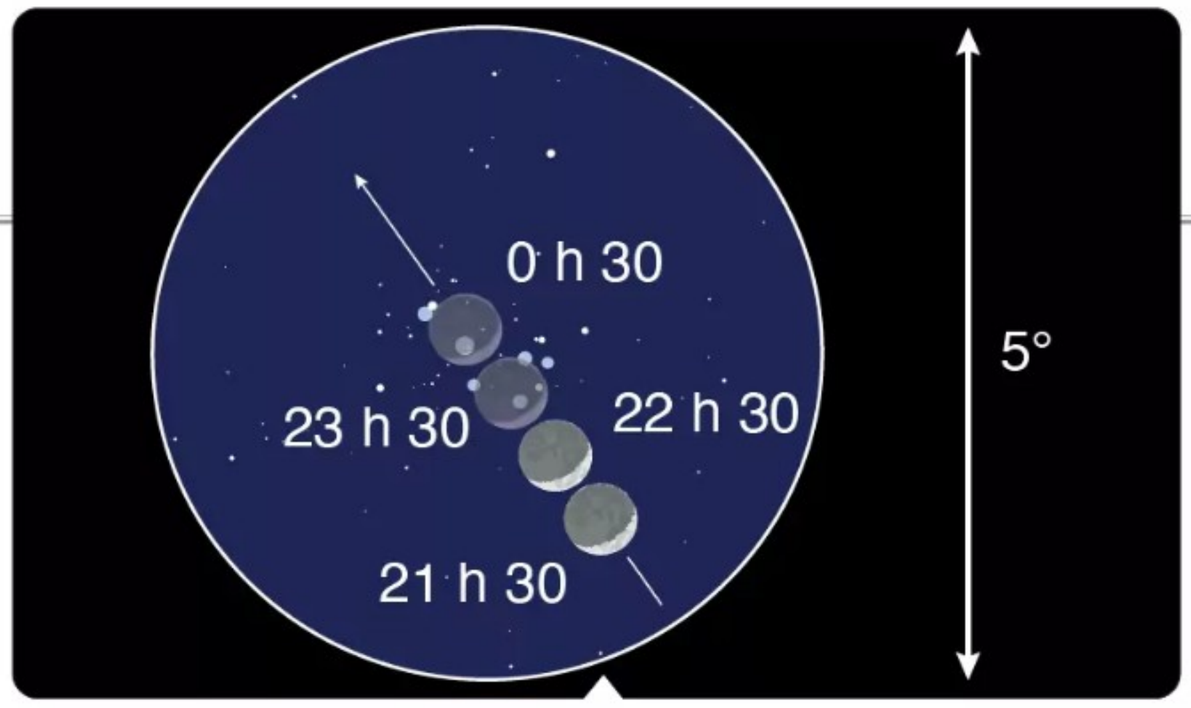
PAR JOHAN KIEKEN

MERCURE Bien que la plus petite des planètes atteigne sa plus grande distance angulaire (27°) à l'ouest du Soleil le 21, elle n'est pas observable sous nos latitudes, trop basse sous un écliptique déjà peu incliné le matin sur l'horizon.



VÉNUS Un mois après son passage en conjonction inférieure, l'étoile du Berger refait son apparition dans le ciel matinal. Son éclat facilite son repérage malgré des conditions d'observation encore médiocres. En fin de mois, elle se lève environ 1h30 avant le Soleil.

MARS La planète Rouge est bien visible dès la tombée de la nuit, haute vers le sud en début de mois puis vers le sud-ouest. Elle s'éloigne peu à peu de la Terre, entraînant une chute de son éclat que l'on peut comparer aux étoiles voisines. Le 12, elle quitte la constellation des Gémeaux pour entrer dans le Cancer.



L'occultation saisie à travers des jumelles. La Lune est représentée en semi-transparence à 23h30 et à 0h30 afin que l'on puisse voir son avancée devant l'amas des Pléiades.

La Lune occulte les Pléiades

LE SOIR DU 1ER, la Lune en croissant accompagnée de sa lumière cendrée passe devant l'amas d'étoiles des Pléiades, dans la constellation du Taureau. Un tel phénomène n'est bien sûr qu'apparent car, dans la réalité, les Pléiades sont plus de 10 milliards de fois plus éloignées que notre satellite!

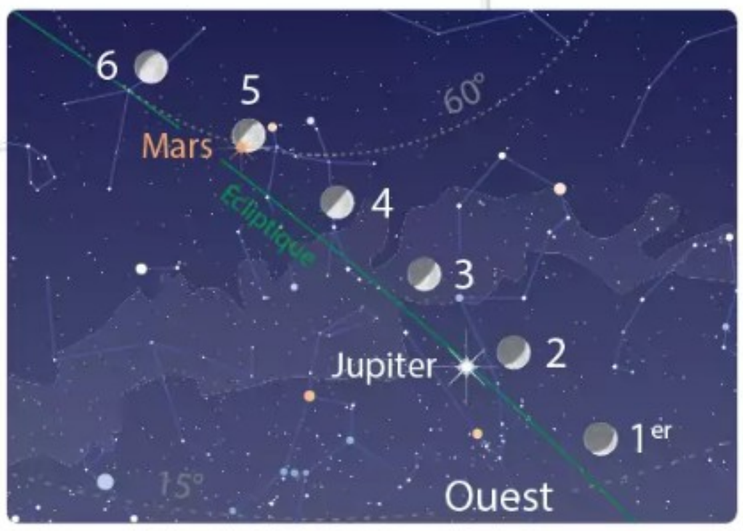
Notre conseil Les jumelles sont l'instrument idéal pour observer cette occultation. Elle se produit alors que, lentement, la Lune se dirige déjà vers son coucher. Il convient donc d'avoir un horizon ouest bien dégagé.

JUPITER La plus massive des planètes brille toujours intensément mais n'est plus visible qu'en première moitié de nuit, vers l'ouest. Sa course la mène à se coucher aux alentours de 1 h du matin.

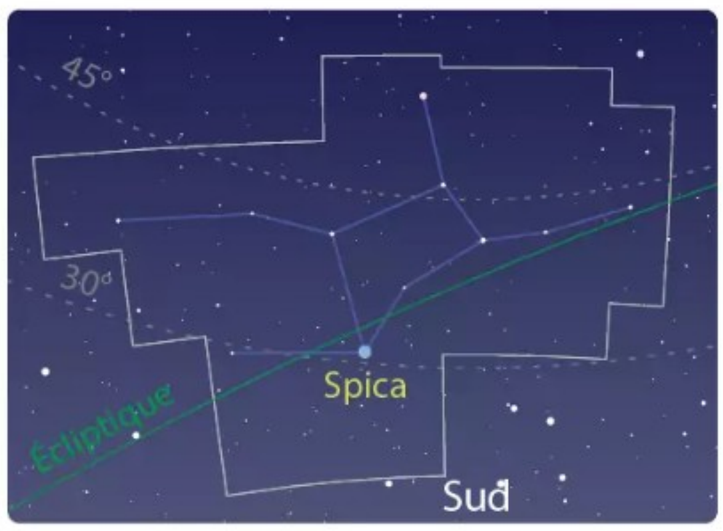
SATURNE Située non loin de Vénus mais encore plus basse sur l'horizon et nettement moins brillante, la planète aux anneaux n'est pas accessible ce mois.

L'appli du mois

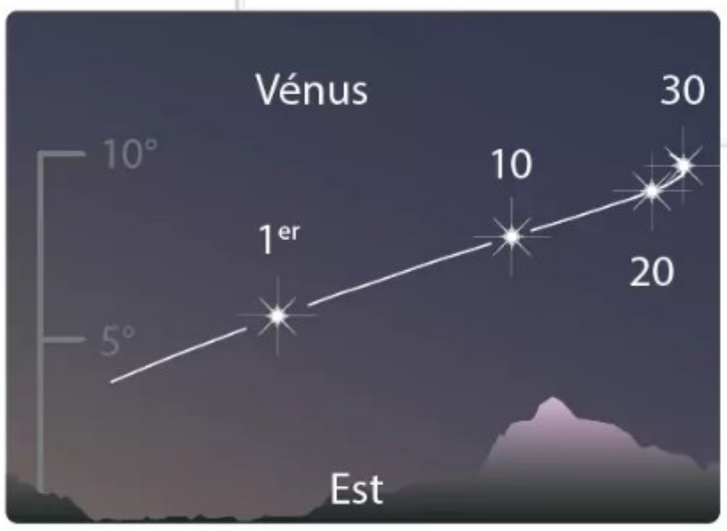
SKYPORTAL est une application gratuite en français pour iOS et Android, développée par Celestron. Utile pour les possesseurs de télescopes de la marque, elle offre la possibilité de piloter l'appareil au moyen de l'application. Mais même sans télescope, elle reste un planétarium virtuel de grande qualité.



DU 1ER AU 6, 2 H APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, observez la Lune à la phase croissante aller à la rencontre des planètes Jupiter (le 2) et Mars (le 5), puis les dépasser.



LA VIERGE EST UNE GRANDE CONSTELLATION typique des nuits de printemps, qui domine l'horizon sud vers 1 h du matin. Son étoile principale est la géante bleutée Spica.



VÉNUS ÉMERGE PROGRESSIVEMENT DES LUEURS DU LEVANT et devient de mieux en mieux observable le matin. Nous sommes ici tournés vers l'est, 30 minutes avant le lever du Soleil.

Scannez ce QR code pour découvrir la carte du ciel d'avril

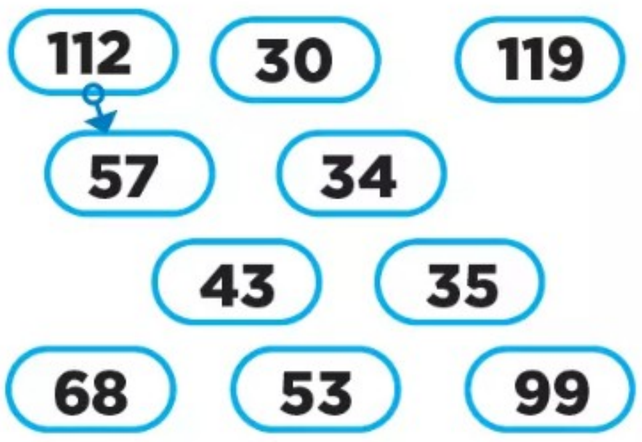
JEUX

PAR PIERRE BERLOQUIN

SOLUTIONS DANS LE PROCHAIN NUMÉRO

▸ Trajet numérique

Saurez-vous joindre ces dix nombres en partant de 112, sans passer deux fois par le même et sans qu'aucun n'ait de diviseur commun avec le suivant ?



▸ Parcours fléché

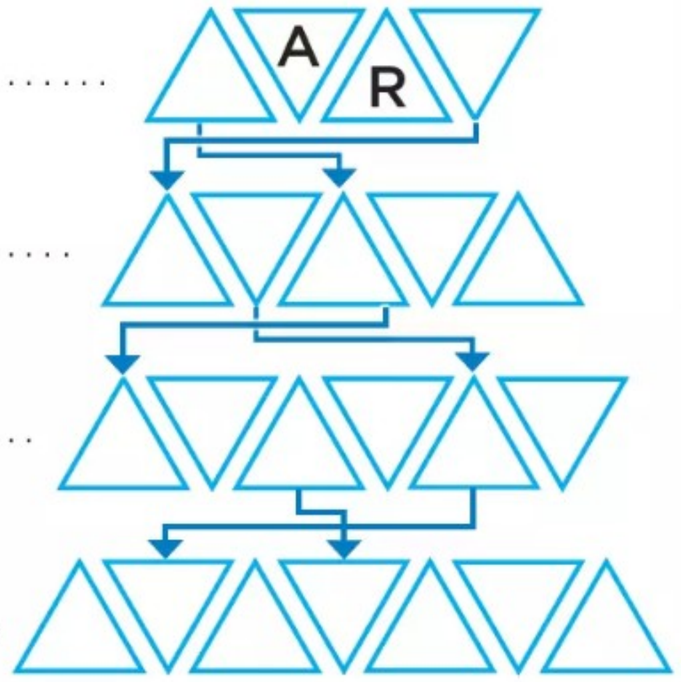
À l'aide des définitions, remplissez les cases vierges. Les flèches signalent une même lettre.

Cage à bébé .....

Conforme ? .....

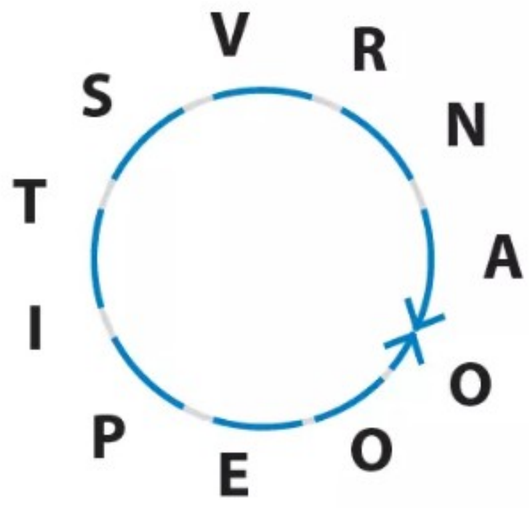
Casserole .....

La vie en est une .....



▸ À cloche-lettre

Quel mot lisez-vous sur ce cercle en sautant à cloche-lettres, de 2 en 2, de 3 en 3 ou autre ?



▸ Addition chiffrée

Dans cette opération, chaque lettre représente un chiffre. Saurez-vous retrouver une correspondance ?

```
  N E U F
+ N E U F
---------
O N Z E
```

▸ Chasse aux signes

Comment peut-on réaliser cette égalité en intercalant entre les chiffres les signes +, −, × et des parenthèses ?

1 2 3 4 5 6 7 8 9
=
190

Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir » n° 937, mars 2025

▸ 2025 !!!

La somme des 9 premiers chiffres, élevée au carré.

$(1 + 2 + 3 + 4 + 5 + 6 + 7 + 8 + 9)^2$

▸ 2025 et ses cubes

$2025 = 1^3 + 2^3 + 3^3 + 4^3 + 5^3 + 6^3 + 7^3 + 8^3 + 9^3$

▸ Bancal, Docteur ?

BANCAL-CALMAR-MARDI-DIVA-VACHE-CHERI-RIPOU-POUPON-PONTON-TONTE-TENOR-NORME-MEDOC-DOCTEUR

▸ Menue logique

Nombre de o ; le café est gratuit.

▸ Machiavel bouleversé

Le hasard gouverne un peu plus de la moitié de nos actions et nous dirigeons ce qui reste. (Chaque groupe de trois mots 1-2-3 est écrit 3-1-2.)

Énigmes Créalude, Pierre Berloquin

LABORATOIRES
ILAPHARM
www.ilapharm.com

A vos côtés, pour votre santé !

Entreprise familiale française depuis 1992, nous vous proposons le meilleur des plantes pour une santé chaque jour renforcée.

**Offre valable 1 mois, 1 seule fois, réservée aux nouveaux clients. Non cumulable avec d'autres offres promotionnelles en cours.*

JAMBES LOURDES
- Active la circulation sanguine
- Légèreté et confort des jambes

45 gélules
6€

ARTICULATIONS
- Mobilité plus aisée
- Souplesse et confort articulaire
- 100% Harpagophytum *(1)*

45 gélules
6€

MINCEUR
- Brûle-graisse naturel
- Besoin de perdre du poids
- Idéal avec le Nopal ! *(3), (5), (10)*

45 gélules
7€

LIBIDO
- Source d'énergie
- Aphrodisiaque
- Stimule le désir sexuel
- Idéal avec le Safran !

45 comprimés
7€

OS & ARTICULATIONS
- Constituant naturel des muscles, os et cartilages
- Formation du collagène

45 gélules
7€

DIGESTION
- Ballonnement et flatulences
- Soulagement rapide *(6), (15)*

45 gélules
7€

PROSTATE
- Confort urinaire
- En cas de mauvais débit urinaire
- Prostate et vessie

45 capsules
7€

STRESS
- En cas de stress et fatigue passagère
- Magnésium et B6 : association optimale

Allergène : poisson. (4)

45 gélules
5€

CHOLESTÉROL
- Régulation du cholestérol
- Bonne santé cardiovasculaire *(10), (12)*

30 gélules
7€

SEXUALITÉ
- Stimule l'érection
- Forte concentration en actifs (crocines)
- Idéal avec la Maca ! *(3)*

20 gélules
7€

MÉMOIRE
- Favorise la circulation cérébrale
- Concentration
- Esprit vif et alerte *(2), (5), (12), (13)*

45 gélules
6€

FOIE - DRAINEUR
- Favorise le fonctionnement du foie
- Détoxifie *(7), (8), (9)*

10 ampoules
7€ ~~15,60€~~

IMMUNITÉ
- Fonctionnement du système de défenses naturelles
- Idéal toute l'année ! *(8), (14)*

45 gélules
7€

SOMMEIL
- Calme et apaise
- Sommeil de qualité
- Ni accoutumance, ni somnolence

45 gélules
6€

POUR LA GORGE
- Gommes à base de Miel, Propolis et Eucalyptus
- Pour adoucir la gorge

45 g
6€ ~~9,90€~~

CAPITAL-VISION
- Préserve la vision au quotidien
- Bonne clarté visuelle *(11)*

10 ampoules
7€ ~~18,40€~~

OFFRE DÉCOUVERTE
Dès **5€***

VOS 2 CADEAUX pour toute commande

OFFERT

Le Plateau et ses 4 sous-verres
Plateau en métal, 21,5x14,5 cm et sous-verre en liège, 10x10 cm.

La Livraison Dès 15€ d'achat
Au lieu de 6,50€ — **0€**

Tous nos produits sont déconseillés aux enfants de moins de 18 ans et aux femmes enceintes ou allaitantes. (1) Déconseillé en cas d'ulcère gastrique ou duodénal. (2) Déconseillé en cas d'insuffisance cardiaque ou rénale œdémateuses. (3) Déconseillé en cas de prise simultanée d'antidépresseurs. (4) Déconseillé aux insuffisants rénaux. (5) Déconseillé aux personnes épileptiques. (6) Espacez la prise de médicaments de celle de ce produit d'au moins 2h. (7) Déconseillé en cas de problème de thyroïde. (8) Ne pas consommer en cas d'allergie aux plantes de la famille des Asteraceae. (9) Ne pas consommer en cas de maladie des voies biliaires et hépatiques. (10) Ne pas associer avec des anticoagulants. (11) En cas de troubles digestifs, consultez votre médecin avant consommation. (12) Déconseillé en cas de traitement concomitant par un médicament anti-rétroviral. (13) Déconseillé en cas de traitement antihypertenseur. (14) Déconseillé en cas de pathologie du système immunitaire. (15) Déconseillé en cas de d'allergie croisée connue, en particulier à la famille des Apiaceae ou au pollen d'armoise ou à l'anéthole. Les éventuelles traces d'allergènes sont indiquées sur l'étiquetage des produits.

NOS GARANTIES

PAYEZ DANS 1 MOIS
*Envoyez votre **réglement par chèque, avec votre bon de commande**, il ne sera encaissé que dans 1 mois.*

Charte Qualité fevad · synadiet · La Poste 72h

POUR COMMANDER

@ C'EST FACILE
sur notre site internet :
www.ilapharm.com

01 49 09 11 11
Du lundi au vendredi :
9h -13h et 14h -18h

ILAPHARM chez DIMOLOG
ZA de la Touche Tizon
8, rue René Panhard
35230 NOYAL-CHÂTILLON-SUR-SEICHE

COMMANDE "OFFRE DÉCOUVERTE" - SANS ENGAGEMENT

Vos coordonnées ☐ Mme ☐ Mr

Nom, Prénom : .....
Adresse : .....
.....
Code Postal : |_|_|_|_|_| Ville : .....
Tél. : ..... Date d'anniversaire : |_|_| |_|_| |_|_|_|_|
E-mail* : .....
pour recevoir les **Offres mails de nos partenaires** ☐ **OUI** ou ☐ **NON**
** Recommandé pour la livraison.*

Choisissez votre mode de paiement

☐ **Par carte bancaire (débit immédiat uniquement) :**
N°|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|
Date d'expiration : |_|_| |_|_|
Chiffres inscrits au dos de ma carte : |_|_|_|

Signature :

☐ **Par chèque, je choisis :** ○ débit immédiat ○ débit dans 1 mois à l'ordre des Laboratoires ILAPHARM

NOM DU PRODUIT	RÉF.	QTÉ	PRIX	TOTAL
JAMBES LOURDES - Vigne Rouge BIO	PVRB45		6€	
ARTICULATIONS - Harpagophytum BIO	PHAB45		6€	
MINCEUR - Guarana BIO	PGUB45		7€	
LIBIDO - Maca BIO	PMAB45		7€	
OS - Silicium Organique et Vitamine C	PSV45		7€	
DIGESTION - Charbon & Fenouil BIO	PCFB45		7€	
PROSTATE - Huile de Courge BIO	PPCB45		7€	
STRESS - Magnésium Marin et B6	PMM45		5€	
CHOLESTÉROL - Ail Noir BIO	PANB30		7€	
SEXUALITÉ - Safran BIO	PSFB20		7€	
MÉMOIRE - Ginkgo Biloba BIO	PGBB45		6€	
FOIE-DRAINEUR - Artichaut - Radis Noir BIO	PXRAB		7€	
IMMUNITÉ - Echinacéa BIO	PECB45		7€	
SOMMEIL - Passiflore BIO	PPAB45		6€	
GORGE - Gommes Propolis, Miel, Eucalyptus BIO	EVAG		6€	
CAPITAL-VISION - Myrtille Myrobalan BIO	PXMMB		7€	
☐ Je reçois **gratuitement** mon **Plateau et 4 sous-verres** et mon Catalogue				**OFFERTS**
☐ Ma commande atteint 15€, **j'économise 6,50€ sur la livraison**				**OFFERTE**
☐ Ma commande est inférieure à 15€, **je rajoute 6,50€ de livraison**				
Code Privilège : **CS456**			**TOTAL À RÉGLER**	.....€

Laboratoires ILAPHARM SAS au capital de 38 112€, RCS Nanterre B 384 620 878 - 27 rue de Solférino - 92100 Boulogne. Tél Sce client 01.49.09.11.11. Offre et frais de livraison valables en France Métropolitaine. En cas d'indisponibilité de votre cadeau, nous pourrons le remplacer par un autre d'une valeur similaire. Pour recevoir votre cadeau sans commander, joignez un chèque de 6,50€ de frais, envoi sous 90 jours. Photos non contractuelles. Pour exercer les droits que vous confère le Règlement européen sur la protection des données, veuillez nous écrire, téléphoner au 01.49.09.11.11 ou consulter nos conditions générales de vente sur notre site internet. Vous bénéficiez des dispositions de la garantie légale de non-conformité et des vices cachés dont la mise en œuvre et le contenu sont prévus aux articles L. 217-4 et suivants du Code de la consommation. Vous disposez d'un délai de rétractation de 30 jours après livraison de votre commande pour retourner les produits pour remboursement ou échange sans pénalités, sauf frais de retour. Traitée dans les 48h suivant sa réception, vous recevez votre commande après 72h d'acheminement environ. Les Laboratoires ILAPHARM adhèrent à la fédération du e-commerce et de la vente à distance (FEVAD) et au service de médiation du e-commerce (BP 20015 - 75362 Paris Cedex 8 - mediateurduecommerce@fevad.com). ADEME emballages : FR202486_01JWKA, ADEME papiers : FR308139_031QWZ. Pour votre santé, mangez au moins 5 fruits et légumes par jour, consultez www.mangerbouger.fr. Conditions générales de vente : www.ilapharm.com/conditions-generales-de-vente.html Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres des Laboratoires ILAPHARM, cochez cette case ☐ ou écrivez-nous. Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres de nos partenaires (commerciaux ou organismes) : cochez cette case ☐ ou écrivez-nous.

VOUS SOUFFLER LES PLUS BELLES IDÉES DE VOYAGE.

1 000 destinations à travers le monde.*

S'ENVOLER EN TOUTE ÉLÉGANCE

AIRFRANCE

MEMBRE DE L'ALLIANCE SKYTEAM

*Avec KLM et nos partenaires SkyTeam.

POUR CONTINUER À VOYAGER DEMAIN, REPENSONS DÈS MAINTENANT NOTRE FAÇON DE NOUS DÉPLACER. ACT

Carburant plus durable, nouveaux avions moins polluants, éco-pilotage sur tous nos vols, retrouvez tous nos engagements sur airfranceact.airfrance.com

Société Air France. SA au capital de 126 748 775€ - 420 495 178 - RCS Bobigny - 45, rue de Paris. 95747 Roissy-CDG Cedex